

CLEISON ADRIANO DE LIMA

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO
PARA ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA NO CONTEXTO DO ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Andreza Germana da Silva Subtil

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L732c
2024
Lima, Cleison Adriano de, 1992-
Construção de um espectrômetro com materiais de baixo
custo para análise da fluorescência no contexto do ensino médio
/ Cleison Adriano de Lima. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (166 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Andreza Germana da Silva Subtil.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Física, 2024.

Referências bibliográficas: f. 117-121.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.164>

1. Física. 2. Estudo e ensino. 3. Ensino médio.
4. Espectroscopia. 5. Fluorescência. I. Subtil, Andreza Germana
da Silva. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Física. Mestrado Profissional em Ensino de Física. III. Título.

CDD 22. ed. 530.07


CLEISON ADRIANO DE LIMA

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO
PARA ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA NO CONTEXTO DO ENSINO MÉDIO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 08 de março de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **CLEISON ADRIANO DE LIMA**
Data: 26/06/2024 17:01:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cleison Adriano de Lima
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ANDREZA GERMANA DA SILVA SUBTIL**
Data: 26/06/2024 19:37:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andreza Germana da Silva Subtil
Orientadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, família, amigos e por fortalecer minha fé nos momentos difíceis do curso e da vida.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Vanderlei e Helena, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Sem a dedicação, carinho e educação que me proporcionaram, eu não seria a pessoa que sou hoje. Também aos meus irmãos, verdadeiros amigos em quem confio plenamente e sei que posso contar a qualquer momento. Amo vocês.

À minha namorada, agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre acreditando em meu potencial e me apoiando.

Aos amigos que, ao longo desta jornada, estiveram presentes para apoiar, estudar, extravasar, festejar, chorar e, principalmente, sorrir. Vocês foram o incentivo que me impulsionou para o ensino superior, e serei eternamente grato por isso.

À República Taberna e a todos os moradores/amigos, meu sincero agradecimento por me acolherem e se tornarem minha segunda família em Viçosa.

À Felícia, minha pequenina companheira.

Aos professores e pós-graduandos, meu reconhecimento por compartilharem tantos conhecimentos, lições de trabalho e de vida. Em especial, à minha orientadora, Andreza Germana da Silva Subtil, agradeço pela orientação, apoio, confiança e pelo exemplo como pessoa, educadora e profissional. Obrigado por me incentivar a cultivar ainda mais o amor pela física e pela profissão docente.

Aos meus alunos, vejo em muitos de vocês o estudante que um dia fui. Sempre vou lutar por uma educação pública de qualidade para que possam alcançar seus sonhos e objetivos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, agradeço pela oportunidade de realizar essa pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

RESUMO

LIMA, Cleison Adriano de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2024. **Construção de um espectrômetro com materiais de baixo custo para análise da fluorescência no contexto do ensino médio.** Orientadora: Andreza Germana da Silva Subtil.

Na investigação do fenômeno da fluorescência, surgiu o interesse em construir um instrumento para análise do espectro de emissão de substâncias fluorescentes. A análise via espectrômetro poderia proporcionar uma compreensão mais profunda desse fenômeno e abrir caminho para aplicações práticas, principalmente no contexto educacional. Espectrômetros são instrumentos projetados para analisar a composição de um feixe luminoso. O espectro resultante, geralmente representado como um gráfico da intensidade pelo comprimento de onda da luz emitida, frequentemente exibe uma série de picos que funcionam como uma espécie de "assinatura" ou "impressão digital" da substância em análise. Espectrômetros comerciais são dispendiosos e, frequentemente, inacessíveis para a realidade do ensino médio. Diante dessa questão, o objetivo principal deste projeto é a construção de um espectrômetro de baixo custo, utilizando materiais de fácil obtenção, e sua implementação por meio de uma sequência didática no ensino médio. O objetivo é introduzir a prática experimental de forma ativa no ambiente da sala de aula e despertar o interesse dos estudantes em áreas como óptica e a interação da luz com a matéria. O diferencial do espectrômetro construído neste trabalho está na simplicidade de sua montagem, sendo um dispositivo compacto e móvel que facilita sua utilização no ambiente escolar. Adicionalmente, ele aborda os princípios básicos da óptica, tais como as propriedades das lentes e a difração, presentes nos currículos de física do ensino médio. A análise visual direta das cores do espectro de emissão no anteparo é intrigante, pois é comum que os estudantes esperem observar apenas a cor do *laser* incidente devido à reflexão. No entanto, o aparato construído revela uma gama de cores adicionais, o que ajuda a elucidar os princípios fundamentais da fluorescência, em que os comprimentos de onda de emissão são maiores do que os de absorção. Como base teórica para a sequência didática, foi utilizada a abordagem de David Ausubel e George Kelly, que ressaltam a construção ativa do conhecimento. Segundo Ausubel, a aprendizagem é dita significativa quando um novo conhecimento

se relaciona de forma não arbitrária e substantiva com o conhecimento prévio do aluno. Para facilitar esse processo, é essencial apresentar ao aluno um material potencialmente significativo. Uma maneira de fazer isso é através de atividades experimentais, que permitem uma abordagem prática e envolvente na recepção do novo conhecimento. Por outro lado, Kelly destaca em seu Ciclo de Experiência Kellyana os caminhos pelos quais uma pessoa constrói o conhecimento. Considerando uma sequência didática com base nesse ciclo, geralmente são aplicados questionários pré-testes e pós-testes com intuito de avaliar os resultados da intervenção. A dissertação e o produto educacional apresentam o passo a passo da construção do espectrômetro e os resultados obtidos, além de proporem uma sequência didática para o uso do aparato experimental em turmas do segundo ano do ensino médio. Os resultados da sequência são discutidos pela análise dos questionários diagnósticos e na interação entre professor e alunos durante as aulas teóricas e práticas. O material produzido está disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

Palavras-chave: Ensino De Física; Instrumentação; Espectrômetro; Fluorescência; Teoria Da Aprendizagem Significativa; David Ausubel; Ciclo De Experiência Kellyana; George Kelly.

ABSTRACT

LIMA, Cleison Adriano de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, march, 2024. **Building a spectrometer with low-cost materials for fluorescence analysis in the high educational context.** Adviser: Andreza Germana da Silva Subtil.

In the investigation of the fluorescence phenomenon, there appeared an interest in constructing an instrument to verify the emission spectrum of fluorescent substances. Analysis using a spectrometer could provide a deeper understanding of this phenomenon and pave the way for practical applications, especially in the educational context. Spectrometers are instruments designed to analyze the composition of a light beam. The resulting spectrum, usually represented as a graph of intensity versus the wavelength of the emitted light, often exhibits a series of peaks that serve as a kind of "signature" or "fingerprint" of the substance under analysis. Commercial spectrometers are expensive and often inaccessible for high school settings. Faced with this issue, the main objective of this project is to construct a low-cost spectrometer using readily available materials and implement it through a didactic sequence in high school. The goal is to actively introduce experimental practice in the classroom environment and spark students' interest in areas such as optics and the interaction of light with matter. The distinctive feature of the spectrometer built in this work lies in the simplicity of its assembly, being a compact and mobile device, which facilitates its use in the school environment. Additionally, it addresses the basic principles of optics, such as lens properties and diffraction, which are present in high school physics national curriculum. The direct visual analysis of the emission spectrum colors on the screen is intriguing, while students commonly expect to observe only the color of the incident laser due to reflection. However, the apparatus built reveals a range of additional colors, which helps elucidate the fundamental principles of fluorescence, where emission wavelengths are longer than absorption wavelengths. As a theoretical basis for the didactic sequence, David Ausubel and George Kelly's approach was used, emphasizing the active construction of knowledge. According to Ausubel, learning is said to be meaningful when new knowledge relates non-arbitrarily and substantively to the student's prior knowledge. To facilitate this process, it is essential to present the student with potentially meaningful material. One way to do this is through experimental activities, which allow a practical and engaging approach to receiving new knowledge.

On the other hand, Kelly highlights in his Kellyan Experience Cycle the ways in which a person constructs knowledge. Considering a didactic sequence based on this cycle, pre-tests and post-tests are usually applied to assess the results of the intervention. The dissertation and the educational product present the step-by-step construction of the spectrometer and the results obtained, as well as propose a didactic sequence for the use of the experimental apparatus in second-year high school classes. The sequence results are discussed through the analysis of diagnostic questionnaires and the interaction between teacher and students during theoretical and practical classes. The material produced is available at the following website: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

Keywords: Physics Education; Instrumentation; Spectrometer; Fluorescence; Meaningful Learning Theory; David Ausubel; Kelly's Experience Cycle; George Kelly.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. FUNDAMENTOS EM ENSINO.....	14
2.1. David Ausubel e a aprendizagem significativa.....	14
2.1.1 Subsunçores	14
2.1.2 Aprendizagem significativa em comparação a aprendizagem mecânica ..	17
2.1.2 Material potencialmente significativo	18
2.2. George Kelly e o Ciclo da Experiência Kellyana	20
2.2.1 A Teoria dos Construtos Pessoais	20
2.2.2 Alternativismo Construtivo.....	22
2.2.2 O Ciclo de Experiência Kellyana	24
2.3. QUESTIONÁRIOS DIAGNÓSTICOS.....	25
3. FUNDAMENTOS EM FÍSICA.....	29
3.1. A natureza da luz.....	29
3.2. Interação da luz com a matéria.....	34
3.2.1. Luminescência	34
3.2.2. Fotoluminescência	41
3.3. Espectrômetros.....	46
3.3.1. <i>Laser</i>	49
3.3.2. Redes de difração	51
3.3.3. Prisma	54
3.3.4. Lentes	57
4. METODOLOGIA.....	61
4.1. Construção do espectrômetro.....	61
4.1.1. Materiais utilizados e procedimentos	62
4.2. Sequência didática.....	68
4.2.1 Preparação da sequência didática	68
4.2.2 Aplicação da sequência didática	72
5. RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	79
5.1. Resultados experimentais do espectrômetro	79
5.1.1. Experimentos com excitação no verde.....	81
5.1.2. Experimentos com excitação no violeta	85
5.2. Resultados dos questionários diagnósticos	91

5.2.1. Questões sobre ondulatória	92
5.2.2. Questões sobre óptica	98
5.2.3. Questões sobre luminescência	101
5.2.4. Questões sobre espectrômetros	106
5.2.5. Comentários dos alunos.....	109
5.2.6. Considerações finais sobre os questionários diagnósticos	111
6. CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE	122
APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL.....	126
A.1. CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO	127
A.1.1. Materiais Utilizados.....	127
A.1.2. Aparato experimental e procedimentos	133
A.2. SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	140
A.2.1 – Sugestões para aula teórica	142
A.2.2 – Sugestões para aula experimental.....	146
A.3. QUESTIONÁRIOS DIAGNÓSTICOS	151
APÊNDICE B - SUGESTÃO DE QUESTÕES DE VESTIBULARES.....	157
APÊNDICE C - PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS	165

1. INTRODUÇÃO

A física tem sido frequentemente impulsionada por perguntas profundamente relevantes, que se tornaram marcos na história da ciência. Neste trabalho, a motivação também surgiu de uma pergunta, pensada ao direcionar um feixe laser sobre diferentes pedaços de papel: “Por que, ao direcionar um laser verde sobre papéis de diferentes cores, a luz percebida parece variar?”. Essa questão motivadora despertou nosso interesse em explorar e compreender mais sobre o tema, levando-nos a realizar esta pesquisa.

Em nossos estudos sobre essa questão, nos deparamos com o fenômeno da fluorescência e ficamos intrigados com a possibilidade de construir um instrumento para verificar seu espectro. A fluorescência é um fenômeno que ocorre quando um material absorve luz em uma determinada faixa de comprimento de onda e emite luz em comprimentos de onda mais longos, após um curto intervalo de tempo. A construção de um espectrômetro para analisar os espectros de fluorescência poderia proporcionar uma compreensão mais profunda desse fenômeno e abrir caminho para aplicações práticas, principalmente no contexto educacional.

Espectrômetros são dispositivos que dispersam a luz emitida por uma substância em seus componentes espectrais, enquanto mede a sua intensidade em uma ampla faixa espectral. Normalmente são utilizadas redes de difração ou prismas para decompor a luz, além de outros instrumentos ópticos como espelhos e lentes. O espectro resultante, geralmente representado como um gráfico da intensidade da decomposição da luz pelo comprimento de onda, frequentemente exibe uma série de picos que funcionam como uma espécie de “assinatura” ou “impressão digital” da substância em análise. Dessa maneira, um espectrômetro é um instrumento muito importante utilizado na investigação da composição molecular e atômica das substâncias. Com esse instrumento pode-se caracterizar uma série de materiais quanto à sua absorção luminosa, fluorescência, espalhamento de luz entre outros fenômenos.

Dispositivos comerciais destinados à espectroscopia costumam ser dispendiosos e, muitas vezes, de difícil acesso para utilização como ferramenta de ensino. Considerando esse contexto e visando incorporar a prática experimental ao

ambiente da sala de aula, foi construído um espectrômetro com materiais de baixo custo e fácil aquisição. A intenção é estimular o interesse dos estudantes quanto a experimentação em áreas como óptica e utilizar as observações experimentais para discutir temas referentes à interação da luz com a matéria, os quais são pouco abordados no contexto escolar.

Como base teórica para a sequência didática, foi utilizada a abordagem de David Ausubel e George Kelly, que ressaltam em suas teorias a construção ativa do conhecimento. Segundo Ausubel, a aprendizagem é dita significativa quando um novo conhecimento se relaciona de forma não arbitrária e substantiva com o conhecimento prévio do aluno. Para facilitar esse processo, é essencial apresentar ao aluno um material potencialmente significativo. Uma maneira de fazer isso é através de atividades experimentais, que permitem uma abordagem prática e envolvente na recepção do novo conhecimento. Adicionalmente, conforme Ausubel destaca, a recepção de um novo conhecimento em forma de um experimento, requer muita atividade cognitiva para relacionar, interativamente, os novos conhecimentos com aqueles já existentes na estrutura cognitiva, envolvendo processos de captação de significados e ancoragem.

Por outro lado, Kelly destaca em seu Ciclo de Experiência Kellyana os caminhos pelos quais uma pessoa constrói o conhecimento. A sequência didática foi pensada e dividida em cinco momentos, compreendendo cinco aulas, de forma a atender o Ciclo de Experiência Kellyana que é composto de cinco fases: Antecipação; Investimento; Encontro; Confirmação ou Desconfirmação e Revisão Construtiva. Em uma proposta de sequência didática baseada nesse ciclo, é comum realizar pré-testes e pós-testes. O pré-teste consiste na aplicação de um questionário diagnóstico prévio, enquanto o pós-teste é aplicado após a conclusão da sequência, para avaliar os resultados obtidos.

Em relação à disposição do texto, nos capítulos dois e três, é discutido, respectivamente, os fundamentos de ensino e os fundamentos de física, sobre os quais foram embasados o trabalho de pesquisa, verificados durante a construção do espectrômetro e na elaboração e aplicação da sequência didática. No capítulo quatro é discutido a abordagem metodológica, no qual detalha-se a construção do

espectrômetro com materiais de baixo custo, assim como a elaboração da sequência didática e sua aplicação.

No capítulo cinco, é discutido os resultados experimentais do espectrômetro construído, comparando as observações visuais com os gráficos gerados por um espectrômetro comercial. Além disso, é feita uma análise dos resultados da sequência didática embasada no Ciclo de Experiência Kellyana e discute-se os resultados dos dados coletados por meio de questionários diagnósticos pré-testes e pós-testes. Nossa ênfase estará na identificação de possíveis conhecimentos prévios (subsunçores), na consolidação desses possíveis subsunçores e na evolução da turma após a conclusão da sequência didática. Também são apresentadas as concepções dos autores sobre os experimentos realizados e sobre os resultados da sequência didática, fundamentadas na interação entre professor e alunos durante as aulas teóricas e práticas. Finalmente faremos nossas considerações finais no capítulo seis. O produto educacional gerado será apresentado no Apêndice. Todo o material produzido está disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

2. FUNDAMENTOS EM ENSINO

Neste capítulo abordaremos as teorias de David Ausubel e George Kelly. Seus estudos, apesar de oriundos de campos distintos, apresentam notáveis contribuições para o campo da educação e da aprendizagem. Ausubel é reconhecido por sua teoria da aprendizagem significativa, e Kelly é pioneiro na psicologia dos construtos pessoais. Ambos os teóricos enfatizam a importância das experiências prévias no processo de aprendizagem. Como veremos, Ausubel defende que o novo conhecimento deve ser ancorado em estruturas cognitivas já existentes, enquanto Kelly postula que as pessoas constroem sistemas pessoais de construtos para interpretar o mundo. Além disso, tanto Ausubel quanto Kelly ressaltam a construção ativa do conhecimento. Ao término deste capítulo, enfatizamos a relevância dos questionários e seu papel na avaliação do conhecimento prévio dos alunos antes do início de uma sequência didática, por meio do pré-teste, e como uma ferramenta para avaliar a compreensão adquirida após a intervenção educacional, por meio do pós-teste.

2.1. David Ausubel e a aprendizagem significativa

David Paul Ausubel (1918-2008) obteve sua graduação em Psicologia e Medicina, completando seu doutorado em Psicologia do Desenvolvimento na Universidade de Columbia, onde, durante muitos anos, atuou como professor no *Teacher's College*. Ausubel dedicou sua carreira acadêmica ao desenvolvimento de uma perspectiva cognitiva à Psicologia Educacional. Uma das mais importantes contribuições de Ausubel é a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) ^[1].

2.1.1 Subsúncões

A Aprendizagem Significativa é um modelo de aprendizagem no qual novas informações interagem de maneira substantiva e não arbitrária com aquilo que o aluno já sabe. O termo "substantiva" refere-se a algo não-literal, não interpretado ao pé da letra. Por sua vez, "não arbitrária" indica que a interação não ocorre com qualquer ideia prévia, mas sim com algum conhecimento específico e relevante já existente na estrutura cognitiva do aluno ^[1]. Esse conhecimento específico, que permite dar

significado a um novo conhecimento, Ausubel define como subsunçor ou ideia-âncora [2].

A estabilidade cognitiva do subsunçor pode variar, apresentando diferentes níveis de diferenciação ou elaboração em termos de significados. Não é apropriado concebê-lo de forma materializada, como um conceito, por exemplo. O subsunçor pode assumir diversas formas, como uma concepção, um construto, uma proposição, uma representação ou um modelo [1]. Contudo, como o processo de aprendizagem é dinâmico e interativo, quando serve de ideia-âncora para um novo conhecimento, ele próprio se modifica adquirindo novos significados, corroborando com os significados já existentes [1]. Uma estrutura dinâmica de subsunçores inter-relacionados e hierarquicamente organizados é definida como estrutura cognitiva [2].

De acordo com Ausubel, o conhecimento prévio representa a variável isolada mais crucial para a realização de aprendizagem significativa de novos conhecimentos. Em outras palavras, se fosse possível identificar uma única variável que exercesse a maior influência sobre novos processos de aprendizado, essa variável seria o conhecimento prévio, representado pelos subsunçores [1]. No contexto educacional, o conceito de subsunçor é de suma importância para o processo de ensino-aprendizagem, pois a atribuição de significados a novos conhecimentos depende da existência desses conhecimentos prévios especificamente relevantes e da interação com eles.

O ensino da ondulatória, por exemplo, é um aspecto fundamental do currículo de física em diversos níveis educacionais. Compreender as propriedades e comportamentos das ondas é essencial para explicar fenômenos naturais e tecnológicos. Nesse contexto, podemos identificar alguns subsunçores relevantes. Em uma situação ideal, o conhecimento prévio dos alunos inclui conceitos básicos de física, como movimento harmônico simples, velocidade, frequência e amplitude. Além disso, os estudantes podem estar familiarizados com conceitos relacionados à propagação de ondas, como ondas sonoras, ondas em uma corda ou ondas em superfícies de lagos. Esses subsunçores fornecem uma base sólida para a construção de novos conhecimentos sobre ondas. Como base nesses conhecimentos prévios, os alunos podem ser apresentados aos conceitos fundamentais das ondas e suas características gerais, como amplitude, frequência, período e comprimento de onda.

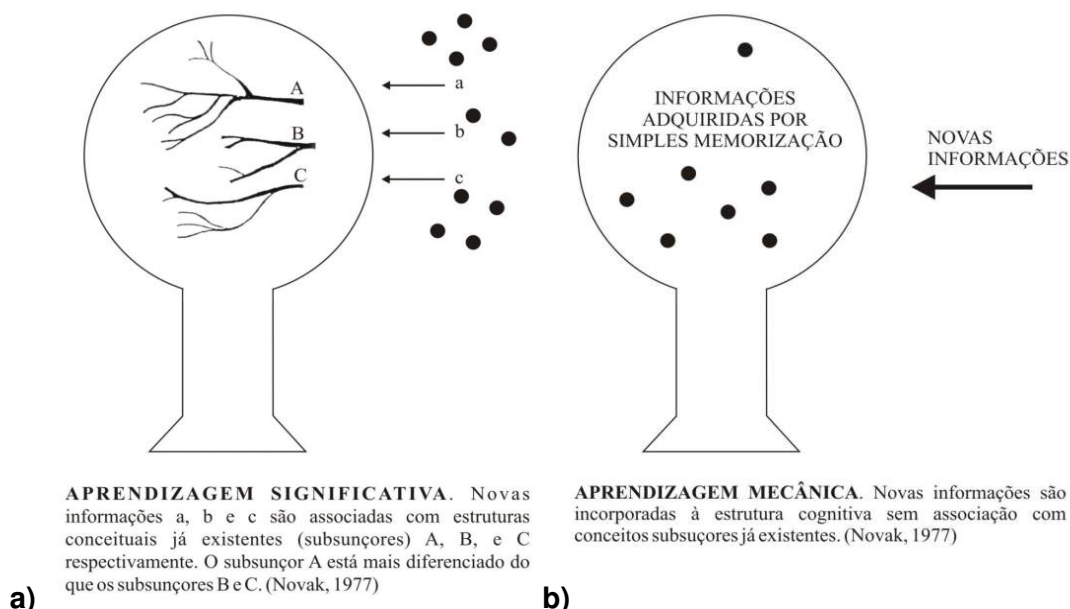
Em um segundo momento poderia ser apresentado o caráter ondulatório da luz, e relacionar o conceito de ondas eletromagnéticas com os subsunçores já presentes na estrutura cognitiva do aluno. Vários outros fenômenos característicos da natureza ondulatória, desde fenômenos de difração e interferência, até fenômenos de interação da luz com a matéria podem ser definidos tomando como base esses subsunçores. Como a fluorescência, destaque neste presente trabalho, que pode ser definida como um fenômeno no qual um material absorve luz em uma determinada faixa de comprimentos de onda e, em seguida, emite luz a um comprimento de onda maior do que o comprimento de onda da luz incidente. Através de novas aprendizagens significativas, resultantes de novas interações entre novos conhecimentos e os subsunçores já estabelecidos, estes ficam cada vez mais estáveis, mais claros e sólidos, proporcionando ao aluno uma compreensão mais profunda e significativa desse importante tópico da física.

Segundo Ausubel, quando um novo conhecimento adquire significado na ancoragem interativa com subsunçores, essa aprendizagem significativa é dita subordinada. Em contrapartida, uma aprendizagem significativa superordenada é definida por Ausubel como a forma de aprendizagem na qual uma nova ideia, um novo conceito, uma nova proposição, mais abrangente, passa a subordinar conhecimentos prévios ^[1]. A estrutura cognitiva é dinâmica, apresentando dois processos principais: a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora. A diferenciação progressiva refere-se ao processo de atribuir novos significados a um subsunçor específico (como um conceito ou uma proposição), que ocorre à medida que esse subsunçor é sucessivamente empregado para conferir significado a novos conhecimentos ^[1]. Esse processo se relaciona com a aprendizagem significativa subordinada. A reconciliação integradora é um componente do dinamismo da estrutura cognitiva, que ocorre simultaneamente ao processo de diferenciação progressiva. Esse processo envolve a eliminação de diferenças aparentes, a resolução de inconsistências, a integração de significados e a criação de superordenações ^[1]. Esse processo está relacionado com aprendizagem significativa superordenada.

2.1.2 Aprendizagem significativa em comparação a aprendizagem mecânica

No que se refere à aprendizagem escolar, Ausubel propõe que sejam estabelecidas duas distinções iniciais, que fazem alusão a dois tipos diferentes de processos: a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica. Esses processos são ilustrados no esquema da Figura 1. Na aprendizagem significativa (Figura 1.a), novas informações a, b e c são associadas com estruturas conceituais já existentes (subsunoçores) A, B e C, respectivamente [3]. Dessa interação percebe-se que são criadas “ramificações”, ou seja, a aprendizagem foi significativa para o aluno, gerando assimilações e atribuindo significados aos novos conhecimentos. Podemos notar ainda que o subsunçor A está mais diferenciado do que os subsunoçores B e C. Já na aprendizagem mecânica (Figura 1.b), novas informações são incorporadas à estrutura cognitiva sem associação com conceitos subsunoçores já existentes [3].

Figura 1 – Aprendizagem significativa *versus* aprendizagem mecânica. a) Na aprendizagem significativa, novas informações são associadas com estruturas conceituais já existentes (subsunoçores). b) na aprendizagem mecânica novas informações são incorporadas à estrutura cognitiva sem associação com conceitos subsunoçores já existentes.



Fonte: extraído da ref. [3].

Uma aprendizagem mecânica, diferentemente da aprendizagem significativa, seria um armazenamento literal, arbitrário e sem significado para as novas informações, resultando em aplicação mecânica a situações conhecidas. Isto pode

ser ilustrado pela memorização automatizada de definições e de conceitos ou proposições da física sem a compreensão do significado das palavras na definição.

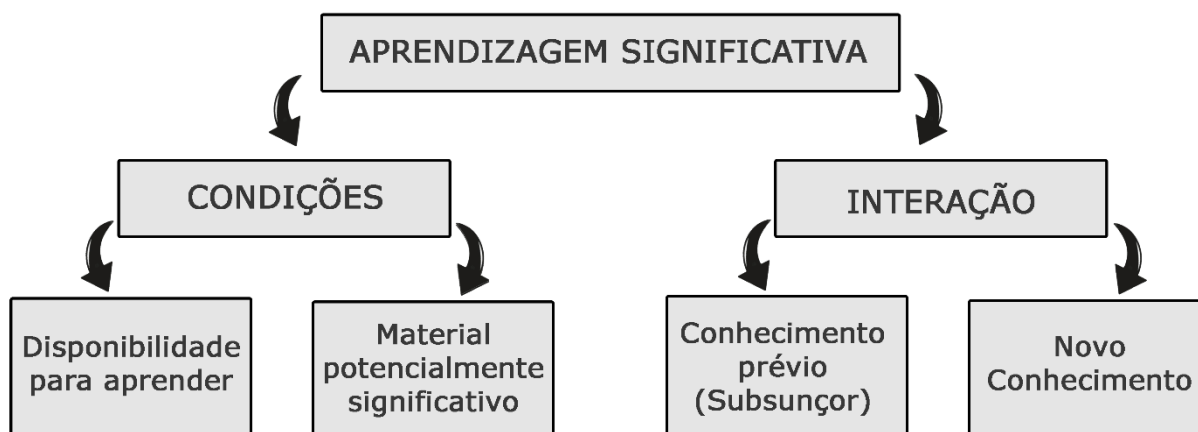
Voltando ao exemplo sobre ondas, um aluno pode aprender sobre a velocidade de uma onda, que afirma que a mesma é proporcional ao produto do comprimento de onda pela frequência. Entretanto, essa proposição não poderá ser aprendida significativamente a menos que o estudante tenha consolidado os significados dos conceitos de comprimento de onda, frequência, direta e inversamente proporcional, etc. Nesse contexto, o aluno não tem subsunçores sólidos necessários em sua estrutura cognitiva para uma aprendizagem significativa do conceito de velocidade de uma onda. Novas informações seriam cada vez mais difíceis de serem compreendidas com clareza. Seria um armazenamento literal, arbitrário e sem significado para esses conceitos, resultando em uma aprendizagem mecânica.

2.1.2 Material potencialmente significativo

Ausubel também destaca em sua teoria que para ocorrer a aprendizagem significativa, deve existir tanto uma disposição do aluno para a aprendizagem significativa como a apresentação ao aluno de um material potencialmente significativo. O material de aprendizagem deve ser relacionado a qualquer estrutura cognitiva apropriada, de forma não arbitrária e substantiva, auxiliando para que as novas informações possam ser relacionadas a subsunçores relevantes já existentes na estrutura cognitiva do aluno. Como destacado no esquema da Figura 2, não basta apenas que o material de aprendizagem seja potencialmente significativo, deve haver, também, uma disposição para a aprendizagem significativa. Ou seja, mesmo o material de aprendizagem consistindo em componentes significativos, o mesmo pode ser aprendido pelo método de decorar (aprendizagem mecânica), se a disposição do aluno para aprender não for significativa [4].

O professor deve atuar de forma a fomentar nos alunos a disposição para a aprendizagem significativa. O aluno deve ser motivado e, para isso, é necessário sequências didáticas interativas que levem em conta os subsunçores dos alunos.

Figura 2 – Condições para a Aprendizagem Significativa da Teoria de Ausubel. Segundo Ausubel, para que ocorra a aprendizagem significativa, deve existir tanto uma disposição do aluno para a aprendizagem significativa como a apresentação ao aluno de um material potencialmente significativo.



Fonte: Próprio Autor, conforme ideias expressas por Ausubel.

As contribuições da teoria de Ausubel podem propiciar ao professor práticas que facilitem a aprendizagem de forma significativa, oferecendo aos alunos mais independência em seu processo de aprendizagem. Para isso, é importante definir a estrutura conceitual, identificar os elementos subsunçores necessários para uma aprendizagem significativa, diagnosticar os subsunçores já presentes na estrutura cognitiva do aluno e utilizar recursos e princípios de ensino que orientem os estudantes em direção a uma aprendizagem significativa [2]. Ao utilizar subsunçores, os professores podem criar uma progressão lógica de conceitos, facilitando a assimilação e conexão entre os conhecimentos prévios dos alunos e os novos conhecimentos, como representado no esquema da Figura 2. Uma vez aprendido determinado conceito, o aluno será capaz de expressar a essência da nova informação com suas próprias palavras, ou seja, esse novo conhecimento gera sentido e significado na estrutura cognitiva do aluno [2].

Em uma sequência didática, um primeiro momento deve ser dedicado a identificação dos conhecimentos prévios (possíveis subsunçores) para determinar o nível de partida dos alunos e definir como os novos conhecimentos devem ser abordados. Em um segundo momento, o material de aprendizagem potencialmente significativo deve ser construído de tal forma que seja relacionável à estrutura cognitiva de forma não-arbitrária e não-literal, levando em conta os subsunçores que

foram identificados no primeiro momento ^[5]. Sobre isso, um ponto que vale ressaltar na teoria de Ausubel é a aprendizagem significativa receptiva, que é aquela em que o aluno é apresentado à informação a ser aprendida em sua forma final. A “recepção” do novo conhecimento pode ser, por exemplo, através de um livro, de uma experiência de laboratório, de um filme, de uma simulação computacional etc. ^[1]. Aprender receptivamente requer muita atividade cognitiva para relacionar, interativamente, os novos conhecimentos com aqueles já existentes na estrutura cognitiva, envolvendo processos de captação de significados e ancoragem ^[1].

Posteriormente, sugere-se que o professor atue de forma a propiciar a sistematização e retenção das novas informações com os subsunçores preexistentes, de forma a tornar os novos conhecimentos mais estáveis na estrutura cognitiva do aluno. Como dito, o processo da aprendizagem significativa é dinâmico e interativo e quando serve de ideia-âncora para um novo conhecimento, os subsunçores se modificam adquirindo novos significados, corroborando com significados já existentes ^[1]. Pode ocorrer que um subsunçor se oblitere ao longo do tempo. Na medida em que um subsunçor não é frequentemente utilizado, ocorre essa inevitável obliteração, essa perda de discriminação entre significados. Isso é um processo normal do funcionamento cognitivo, é um esquecimento, mas em se tratando de aprendizagem significativa a reaprendizagem é possível e relativamente rápida ^[1]. Esse fato difere muito da aprendizagem mecânica. Se o esquecimento for total, como se o indivíduo nunca tivesse aprendido um certo conteúdo, é provável que a aprendizagem tenha sido mecânica, não significativa.

2.2. George Kelly e o Ciclo da Experiência Kellyana

George Alexander Kelly (1905 – 1967) foi um psicólogo e educador dos Estados Unidos, com uma formação abrangente em Física, Matemática, Educação e Sociologia, culminando com um doutorado em Psicologia pela *State University of Iowa*. Sua obra mais destacada, "*The Psychology of Personal Constructs*", publicada em 1955, é uma teoria sobre a personalidade reconhecida internacionalmente.

2.2.1 A Teoria dos Construtos Pessoais

Na visão de Kelly, a personalidade é concebida como sistemas de construtos pessoais, os quais cada indivíduo emprega na formulação de previsões,

fundamentando-se em experiências passadas. O construto representa uma unidade essencial que aborda as características que cada pessoa identifica nos eventos que experimenta [6].

A Teoria dos Construtos Pessoais de George Kelly destaca que o ser humano apresenta a capacidade criativa de representar seu ambiente, não simplesmente responder a ele. Segundo a metáfora do “homem científico”, as pessoas são como cientistas que constroem teorias pessoais para entender e prever o mundo ao seu redor [7]. O ser humano está em uma permanente tentativa de prever e controlar o fluxo de eventos no qual está envolvido, e cada indivíduo contempla à sua maneira o fluxo de eventos no universo. Quando uma pessoa decide o que vai comer em um restaurante, por exemplo, ela está agindo de forma muito semelhante a um cientista, ou seja, ela se questiona qual é a melhor opção do cardápio, formula hipóteses de quais as melhores combinações de prato principal e sobremesa, depois pode testar essas hipóteses ao experimentar os pratos escolhidos e, por fim, tira suas conclusões após a refeição. Esse é o processo pelo qual, segundo Kelly, as pessoas constroem seus construtos pessoais. Para ele, os indivíduos desenvolvem suas próprias teorias, a partir das hipóteses levantadas, testando-as por meio de suas experimentações, que podem ser mantidas, refutadas ou modificadas [7].

Os mais familiarizados com a história da física lembram da famosa expressão "Eureka!", que é uma exclamação atribuída a Arquimedes que significa "Eu encontrei!" em grego [8]. Segundo a história, supõe-se que Arquimedes estava se divertindo em seu banho quando fez uma importante descoberta relacionada ao princípio de deslocamento de líquidos e à densidade de objetos [8]. Neste contexto, Kelly examina o comportamento científico como um paradigma para entender o comportamento humano. Muitas teorias têm sua origem em observações simples, frequentemente ocorrendo em situações cotidianas. Os cientistas são indivíduos, e embora não se possa generalizar afirmando que toda pessoa é um cientista, é pertinente questionar se não é a essência humana que define os cientistas [6]. Isso nos leva à indagação de como essa essência humana pode ser mais adequadamente interpretada para compreender os cientistas.

2.2.2 Alternativismo Construtivo

A Teoria dos Construtos Pessoais propõe abordagens que explicam como os processos psicológicos podem impulsionar a empreitada científica [6]. Essa teoria se baseia em uma posição filosófica denominada Alternativismo Construtivo e se organiza em um postulado fundamental e onze corolários (Figura 3). O Alternativismo Construtivo afirma que todas as nossas atuais interpretações do universo estão sujeitas a serem revistas e substituídas. Nessa abordagem, cada indivíduo elabora suas próprias interpretações do mundo, fundamentando-se em experiências vivenciadas que podem ser passíveis de revisão e substituição. Este princípio destaca que o ser humano é o construtor de seu próprio conhecimento, alicerçado em suas próprias concepções, derivadas dos modelos que ele avalia. Nesse contexto, Kelly destaca que cada indivíduo é livre em suas escolhas, sendo o seu comportamento vinculado a essas escolhas individuais [6].

Figura 3 – Esquema simplificado para Teoria dos Construtos Pessoais de George Kelly. Essa teoria se baseia em uma posição filosófica denominada Alternativismo Construtivo e se organiza em um postulado fundamental e onze corolários.



Fonte: Próprio Autor, conforme ideias expressas por Kelly.

O Postulado Fundamental estabelece que os processos de uma pessoa são psicologicamente canalizados pelas maneiras como ela antecipa eventos, ou seja, a

conduta de uma pessoa no presente é determinada pela maneira em que ela antecipa eventos futuros. Já cada corolário trata de uma forma de construir, organizar e estabelecer relações sociais a partir das diferentes formas de ver e interagir com o mundo [6].

Os onze corolários propostos por Kelly delineiam princípios fundamentais da teoria dos construtos pessoais. O corolário da construção enfatiza que eventos repetidos e semelhantes possibilitam que as pessoas antecipem ou prevejam como serão experienciados no futuro. O corolário da individualidade destaca a compreensão única que cada pessoa tem dos eventos. Quanto ao corolário da organização, destaca-se que a estruturação dos construtos ocorre por meio de padrões, considerando suas semelhanças ou diferenças. O corolário da dicotomia ressalta que os construtos são bipolarizados, apresentando duas alternativas mutuamente exclusivas para antecipar eventos corretamente. A liberdade de escolha é enfatizada no corolário da escolha, que destaca que a decisão de cada construto está na alternativa que parece ser a melhor, permitindo prever os resultados de eventos antecipados [6].

O corolário da faixa reconhece que os construtos podem aplicar-se a diversas situações ou pessoas, variando em sua amplitude de relevância. O corolário da experiência indica que os construtos são testados continuamente na vida para garantir que permaneçam válidos, sendo expostos a novas experiências. O corolário da modulação ressalta a capacidade de modificar construtos com base em novas experiências, considerando a permeabilidade desses construtos para revisão e expansão. O corolário da fragmentação reconhece a possibilidade de construtos subordinados contraditórios ou incoerentes no sistema geral, e o corolário da similaridade destaca que pessoas em grupos ou culturas compatíveis podem apresentar construtos semelhantes, evidenciando similaridades na interpretação de eventos. Por fim, o corolário da sociabilidade aborda a tentativa de compreender o pensamento das pessoas, prever suas ações e, conforme necessário, modificar o comportamento nas relações interpessoais, onde cada indivíduo desempenha papéis distintos em relação aos outros [6].

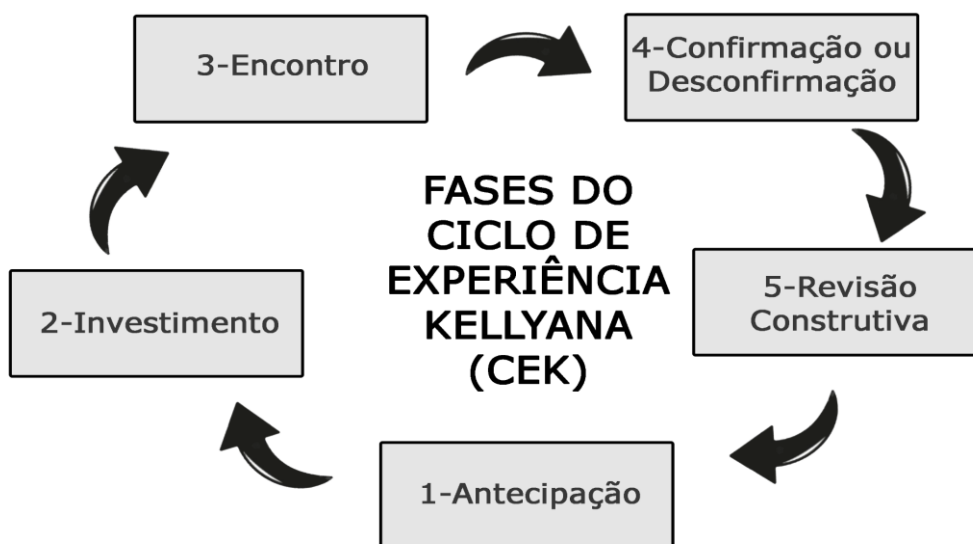
A abordagem metodológica destacada neste trabalho concentra-se principalmente no corolário da Experiência, que reflete a perspectiva de Kelly sobre

como as pessoas aprendem por meio de ciclos de experiência. De acordo com esse corolário, as pessoas continuamente submetem seus construtos a testes na vivência cotidiana para assegurar sua validade. Este corolário enfatiza, ainda, que os construtos de uma pessoa evoluem à medida que ela recria repetidamente eventos. Se a sequência de acontecimentos vivenciados por um indivíduo não estiver em consonância com suas representações, seu sistema de construção pode ser modificado ou reconstruído, o que, segundo Kelly, constitui o processo de aprendizagem [7].

2.2.2 O Ciclo de Experiência Kellyana

George Kelly aponta aspectos teóricos e práticos de como uma pessoa aprende, com foco no paradigma prático e reflexivo. O Ciclo de Experiência Kellyana (CEK), representado na Figura 4, consiste em cinco fases: Antecipação, Investimento, Encontro, Confirmação ou Desconfirmação e Revisão Construtiva. Esse ciclo apresenta caminhos de como uma pessoa constrói o conhecimento [9].

Figura 4 – Esquema simplificado do Ciclo da Experiência Kellyana que consiste em cinco fases: Antecipação, Investimento, Encontro, Confirmação ou Desconfirmação e Revisão Construtiva.



Fonte: Próprio Autor, conforme ideias expressas por Kelly.

Na fase de Antecipação, o indivíduo inicia suas reflexões sobre o evento em que irá participar, formulando hipóteses. Na fase do Investimento, com base na construção de réplicas dos eventos futuros, o indivíduo busca investir seu esforço em

obter mais informações, contribuindo assim para a construção de seu conhecimento. Na fase do Encontro, o indivíduo vivencia diretamente o evento, tendo a oportunidade de refletir sobre as ideias previamente construídas nas fases de Antecipação e Investimento [9]. Na etapa de confirmação ou desconfirmação, o indivíduo é instigado a reavaliar suas concepções prévias com base no evento vivenciado, submetendo suas hipóteses a teste, podendo estas serem validadas ou contestadas.

Por fim, na fase de revisão construtiva, o indivíduo tem a oportunidade de reconsiderar suas experiências vividas, contribuindo para a formação de novos conhecimentos [9]. Conforme a visão de Kelly, a aprendizagem ocorre à medida que uma pessoa atravessa essas cinco fases, promovendo uma mudança em sua estrutura cognitiva a partir das experiências anteriores [9]. Em uma proposta de sequência didática baseada nesse ciclo, é comum realizar pré-testes e pós-testes. O pré-teste consiste na aplicação de um questionário antes da sequência didática, enquanto o pós-teste é aplicado após a conclusão da sequência, para avaliar os resultados obtidos [7].

De acordo com o construtivismo de Kelly, uma responsabilidade do professor é proporcionar aos estudantes situações nas quais possam articular, estender ou desafiar seus construtos pessoais por meio dos construtos formais da visão científica. Entender isso não implica que os alunos devem ser deixados por conta própria para construir suas perspectivas do mundo sem a exposição a teorias científicas (e, geralmente, mais fundamentadas). No entanto, o ponto crucial é que esse conhecimento formal deve ser apresentado como hipotético e sujeito à reconstrução e avaliação pelos próprios alunos [7].

2.3. QUESTIONÁRIOS DIAGNÓSTICOS

Na área educacional, em que se busca mensurar os ganhos de conhecimento resultantes da manipulação de condições externas ao aluno, os testes objetivos se destacam como a ferramenta mais comumente empregada para avaliar o que foi aprendido. Mesmo em situações cotidianas, como as comuns em sala de aula, onde não há um contexto de pesquisa formal, os testes objetivos continuam sendo a principal ferramenta utilizada para avaliar o nível de aprendizagem dos alunos [10].

Um projeto de levantamento de dados apresenta uma descrição quantitativa de tendências, atitudes ou opiniões de uma população, estudando-se uma amostra dessa população [11]. A partir dos resultados da amostra, o pesquisador generaliza ou faz afirmações sobre a população. Em um experimento, por exemplo, a intenção básica é testar o impacto de um tratamento (ou de uma intervenção) sobre um resultado, controlando outros fatores que possam influenciar esse resultado. A partir disso, os pesquisadores também podem analisar uma amostragem e generalizar para uma população [11].

Como parte da coleta de dados, o instrumento de levantamento a ser usado no estudo proposto é de suma importância. Cada vez mais estão sendo designados instrumentos para levantamentos *on-line*. Ao empregar esses serviços, os pesquisadores têm a capacidade de criar de maneira ágil suas próprias pesquisas, utilizando modelos personalizados e disponibilizando-os em sites da web ou enviando-os por e-mail aos participantes para que sejam preenchidos. Posteriormente, é possível gerar resultados e encaminhá-los ao pesquisador na forma de estatísticas descritivas ou representações gráficas, facilitando o *download* dos resultados em uma planilha eletrônica ou banco de dados para análises futuras [11].

Além disso, os questionários são um dos instrumentos mais utilizados na área de pesquisa em ensino e são constituídos por uma sequência de perguntas com referências às variáveis do estudo em questão [10]. Os questionários podem apresentar perguntas abertas e perguntas objetivas (fechadas). Em uma pergunta aberta, o entrevistado, em geral, pode redigir uma resposta livremente, porém perguntas abertas apresentam maior dificuldade no momento da tabulação ou análise. Por outro lado, acabam fornecendo mais informações ao pesquisador. Perguntas objetivas são mais fáceis de se responder, tabular e analisar [10].

Ao criar um questionário é fundamental esclarecer ou detalhar os termos que podem ser facilmente mal compreendidos. É importante ter em mente as negações duplas e realçá-las visualmente, como por sublinhados, negrito ou fontes diferentes, para garantir clareza. Palavras que merecem destaque também devem ser sublinhadas ou realçadas com uma fonte diferente para atrair a atenção [10]. As alternativas inadequadas devem ser manuseadas com cuidado, e cada pergunta deve se concentrar apenas em um tópico específico. Quando as perguntas do questionário

envolvem classificação ou comparação, é fundamental fornecer um ponto de referência. É essencial evitar formulações de perguntas baseadas em suposições infundadas. As questões devem ser redigidas de maneira acessível a todos os respondentes e projetadas para garantir respostas abrangentes e conclusivas [10].

Também vale destacar que um questionário eficaz trata de tópicos relevantes para os respondentes, fazendo com que eles estejam dispostos a gastar tempo e esforço para respondê-lo e ele não deve solicitar informações que possam ser obtidas de outras fontes. O questionário deve ser conciso e ter uma apresentação limpa e uma redação cuidadosa [10]. As instruções precisam ser claras e abrangentes, com definições para termos importantes, cada pergunta abordando apenas um conceito e usando uma linguagem simples e clara. As perguntas devem ser imparciais, sem insinuar qualquer tipo de resposta. Elas devem ser organizadas logicamente, começando pelas mais gerais e progredindo para as mais específicas. A organização deve facilitar a tabulação e à interpretação dos dados, muitas vezes envolvendo a criação de tabelas antecipadamente para evitar confusões no formato final do questionário [10].

Sob a luz da teoria de Ausubel, os questionários de pré-teste podem ser projetados para identificação dos conhecimentos prévios (possíveis subsunçores) sobre os conceitos que serão ensinados. Isso permite identificar as lacunas no conhecimento e as percepções pré-existentes dos alunos sobre o tópico. Durante a sequência didática, o professor deve conectar o novo conteúdo ao conhecimento prévio dos alunos de forma a promover a aprendizagem significativa, já que os novos conceitos são integrados a estruturas cognitivas já existentes. Já os questionários de pós-teste avaliam a compreensão adquirida após a intervenção. Se os alunos conseguirem relacionar o novo material ao conhecimento prévio de maneira eficaz, isso poderá refletir uma aprendizagem mais duradoura e profunda.

Pensando na teoria de Kelly, os questionários de pré-teste podem investigar as percepções iniciais dos alunos sobre um determinado conceito ou situação. Isso fornece *insights* sobre como os alunos constroem seus construtos pessoais para entender o tópico em questão. Durante a sequência didática, a instrução pode ser planejada de modo a desafiar, expandir ou reorganizar os construtos pessoais dos alunos. Isso pode levar a mudanças na maneira como eles interpretam e dão

significado às informações. Já os questionários de pós-teste podem indicar mudanças nos construtos pessoais dos alunos após a intervenção. Comparando as respostas dos pré-teste e pós-teste, é possível avaliar a evolução na maneira como eles percebem e compreendem o tópico.

3. FUNDAMENTOS EM FÍSICA

Neste capítulo, exploramos os princípios fundamentais que regem a luz e sua interação com a matéria. Iniciamos com uma análise histórica da natureza da luz, abordando sua dualidade onda-partícula e os fenômenos que a caracterizam. Em seguida, examinamos a interação da luz com a matéria, destacando os processos de luminescência e fotoluminescência. Por fim, são discutidos os espectrômetros, instrumentos essenciais para a análise espectral da luz, com foco nos principais componentes e suas respectivas funções. Este capítulo proporciona uma base sólida para o entendimento dos temas abordados neste trabalho, fornecendo um embasamento teórico necessário para o estudo da interação da luz com a matéria, com foco na fotoluminescência, e da espectroscopia.

3.1. A natureza da luz

Desde a antiguidade, o entendimento sobre a natureza da luz tem sido um desafio. O entendimento da cor encontra suas fundações nos famosos experimentos de Isaac Newton (1643 - 1727), como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Experimento de Newton sobre a decomposição da luz branca com um prisma. Sua conclusão foi que a luz branca era composta por uma mistura de todas as cores do espectro. Gravura de Louden, meados do Século XIV.



Fonte: extraída da ref. [13]

Os experimentos históricos foram realizados no *Trinity College, Cambridge*, quando Newton fez um pequeno orifício na parede de sua sala escura para que, através dele, os raios diretos do sol pudessem passar e formar uma imagem do disco do sol na parede oposta da sala [12]. Tomando um prisma de vidro, e colocando-o próximo ao orifício, Newton observou que a luz estava espalhada, sobre o que ele foi o primeiro a chamar de espectro, em uma faixa de luz colorida: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. Sua conclusão foi que a luz branca não era a entidade homogênea simples que era natural esperar que fosse, mas era composta por uma mistura de todas as cores do espectro [12].

Christiaan Huygens (1629 - 1695), contemporâneo de Newton, defendia a concepção de que a luz seria um pulso não periódico propagado pelo éter [14]. Posteriormente, já no século XIX, James Clerk Maxwell (1831 - 1879) realizou uma das sínteses mais fundamentais na história da Física ao mostrar que todos os fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos podem ser descritos a partir de um conjunto de equações diferenciais, conhecidas como equações de Maxwell [15]. As equações de Maxwell descrevem o comportamento das ondas eletromagnéticas e podem ser expressas para o vácuo como:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (3.4)$$

em que \vec{E} e \vec{B} são respectivamente os vetores campo elétrico e campo magnético, \vec{J} é o vetor corrente de deslocamento, ρ é a densidade volumétrica de carga elétrica e ϵ_0 e μ_0 são, respectivamente, as constantes de permissividade e permeabilidade no vácuo e valem $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N A^{-2}$ [15]. A partir das equações de Maxwell é possível deduzir a equação de onda no vácuo, concluindo que a luz é uma onda eletromagnética, podendo a velocidade da luz ser calculada através de medições de grandezas puramente eletromagnéticas e, portanto, concluir que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo, livre de cargas e correntes elétricas é aproximadamente:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2,99 \times 10^8 \text{ms}^{-1} = c, \quad (3.5)$$

ou seja, a própria velocidade da luz [15].

Posteriormente, Heinrich Hertz (1857 - 1894) realizou experiências que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas [16], e outros experimentos mostraram que a luz apresenta os fenômenos de interferência e difração. O fenômeno da difração, comum a todos os tipos de ondas, é perceptível quando uma onda encontra um obstáculo ou uma fenda de tamanho comparável ao seu comprimento de onda. Devido ao comprimento de onda da luz visível ser da ordem de centenas de nanômetros, a difração da luz não é facilmente observada no cotidiano. Para múltiplos obstáculos, como observado no experimento de dupla fenda de Thomas Young (1773 – 1829), se tem um padrão complexo de intensidade variável devido ao fenômeno da interferência [16]. Todas essas contribuições reforçaram a predominância da concepção ondulatória da luz ao final do século XIX.

Max Planck (1858 - 1947), no início do século XX, resolveu o problema da radiação do corpo negro propondo que a energia de uma cavidade deveria ser quantizada de forma que o elemento de energia possua um valor mínimo proporcional à frequência da componente da radiação emitida [17]. A esse valor, chamou-se *quantum* e as energias seriam escritas em múltiplos de *quantum* (palavra latina que significa quantidade, cujo plural é *quanta*) de energia [17]. Albert Einstein (1879 - 1955) retomou as ideias de Planck, corrigindo-as em um ponto fundamental. Se Planck tinha encontrado a lei quântica, a que reproduz as observações, é porque ele tinha concebido uma maneira original de calcular as configurações, ao contrário da descrição clássica [18]. Nessa formulação, Einstein mostrou que a luz deveria ser constituída de pacotes (os *quanta*) que carregavam uma quantidade finita de energia (E) equivalente ao produto da constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) pela frequência (ν) da luz [17]:

$$E = h\nu. \quad (3.6)$$

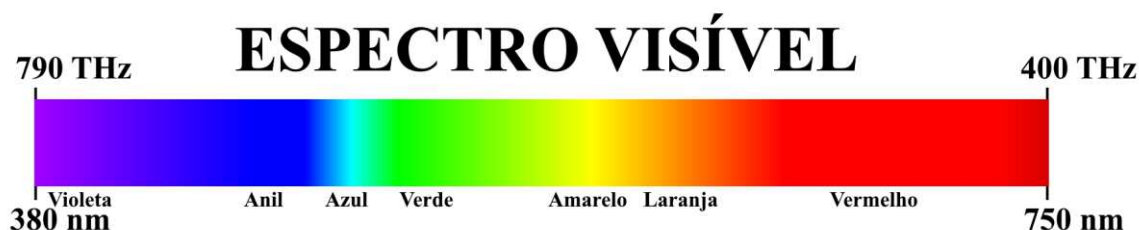
Hertz, o mesmo que realizou as experiências que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas, observou em um de seus experimentos que uma descarga elétrica entre dois eletrodos é facilitada quando radiação ultravioleta incide em um

deles, fazendo com que elétrons sejam emitidos de sua superfície ^[18]. Esse fenômeno foi chamado Efeito Fotoelétrico e, até então, não era possível explicar de forma satisfatória porque apenas ondas a partir de uma determinada frequência poderiam arrancar elétrons de uma superfície metálica. Einstein propôs em sua interpretação que um elétron seria emitido porque um *quantum* de luz colidira com ele, abrindo mão de toda sua energia. Por seus serviços à Física Teórica e, especialmente, pela descoberta da lei do Efeito Fotoelétrico, o Prêmio Nobel de Física de 1921 foi concedido a Albert Einstein ^[19]. Posteriormente, Robert Millikan (1868 - 1953) mediu o efeito fotoelétrico, comprovando a teoria de Einstein, e mediu, também, a constante de Planck. Esses resultados foram de suma importância para a aceitação dos *quanta* pela comunidade científica da época. Vale ressaltar que o termo fóton foi introduzido pelo químico Gilbert Lewis (1875 - 1946) apenas em 1926 ^[20].

Os fótons são atualmente mais bem explicados pela mecânica quântica. A luz e, por extensão, todas as radiações eletromagnéticas apresentam um caráter dual, apresentando comportamento de ondas em fenômenos como a interferência e difração e comportando-se como partículas em fenômenos como o efeito fotoelétrico ^[21]. Do ponto de vista da mecânica quântica, toda a radiação eletromagnética é quantizada em fótons, isto é, a menor porção de radiação eletromagnética que pode existir é um fóton, qualquer que seja seu comprimento de onda, frequência, energia ou momento e a intensidade ou brilho da luz está ligada a quantidade deles ^[21]. Fótons têm massa de repouso nula e não possuem carga elétrica. Apesar da sua ausência de massa, fótons têm um momento proporcional à sua frequência e seu momento pode ser transferido quando um fóton “colide” com a matéria ^[21]. Fótons estão sempre se movendo à velocidade da luz em relação a todos os observadores e a velocidade da luz no vácuo de qualquer fóton, não importando sua energia, é aproximadamente $2,99 \cdot 10^8 m s^{-1}$ ^[21].

O espectro visível, Figura 6, é a parte do espectro eletromagnético composta por fótons que podem sensibilizar o olho humano. Essa faixa de radiação abrange cores diferentes, como observado por Newton, e seus comprimentos de onda variam de cerca de 380 a 750 nm ($10^{-9} m$), do violeta ao vermelho ^[16].

Figura 6 – Representação do espectro visível, a parte do espectro eletromagnético composta por fótons que podem sensibilizar o olho humano.



Fonte: Próprio Autor.

Deve ser enfatizado que os nomes de cores e os limites do comprimento de onda fornecidos são destinados apenas a um guia, pois cada cor se funde gradualmente na próxima, de forma que não há um limite exato ^[12]. Os nomes dados são úteis para interpretação de dados científicos que são apresentados comumente em funções de comprimento de onda. Embora seja a prática mais comum, vale ressaltar que seria mais fundamental usar a frequência para identificar as cores do espectro, pois na refração a luz de qualquer parte do espectro, à medida que passa para um meio mais refringente, seu comprimento de onda diminui por ser dividido pelo índice de refração desse meio, no entanto, a velocidade (v) também diminui na mesma proporção, de modo que a frequência (ν), a velocidade dividida pelo comprimento de onda (λ) (equação 3.7), permanece sempre constante, só dependendo da fonte que a gerou ^[12].

$$v = \lambda \nu . \quad (3.7)$$

Dessa forma, o espectro visível se estende, em termos da frequência, de aproximadamente 790 a 400 THz (10^{12} Hz), do violeta ao vermelho ^[16].

3.2. Interação da luz com a matéria

A interação da luz com a matéria pode se dar de diversas maneiras dependendo das propriedades da radiação como frequência, polarização, intensidade e das propriedades do meio interagente. A cor dos materiais geralmente é resultado da interação com a luz que pode ser refletida, transmitida ou absorvida, de acordo com seu comprimento de onda e de acordo com cada material. A partir da análise da interação da luz com os materiais podemos extrair informações físico-químicas extremamente importantes como que tipo de átomos ou moléculas que o compõem, como esses átomos e moléculas relacionam entre si para formar a estrutura do material, se o material sofreu algum processo físico e/ou químico, etc. Além dos processos de transmissão, absorção e reflexão, a luz pode induzir num material processos internos complexos que podem fazer com que o material possa reemitir uma radiação com propriedades muito distintas da radiação incidente. Alguns tipos de luminescência e espalhamentos inelásticos de luz são exemplos desses processos cuja análise tem grande importância científica, comercial e industrial. Em particular, a fluorescência é usada extensivamente em várias áreas da ciência, biotecnologia, diagnóstico médico, sequenciamento de DNA, análise forense e genética, para citar alguns [22].

3.2.1. Luminescência

O termo luminescência, que tem origem do latim (*lumen* = luz), foi introduzido na literatura pelo físico alemão Eilhard Wiedemann (1852 - 1928) em 1888 [23-25]. Os vários fenômenos de luminescência recebem nomes baseados no tipo de estímulo usado para excitar a emissão, como ilustra a Tabela 3.1.

O fenômeno da luminescência é caracterizado quando certos tipos de substâncias emitem luz ao absorver energia, sem que ocorra o aumento da temperatura. A luminescência é obtida sob diversas fontes de excitação e o comprimento de onda da luz emitida é característico da substância luminescente e não da radiação incidente [22-24]. Como se pode perceber pela Tabela 1 a luminescência é um fenômeno bem abrangente [22-26].

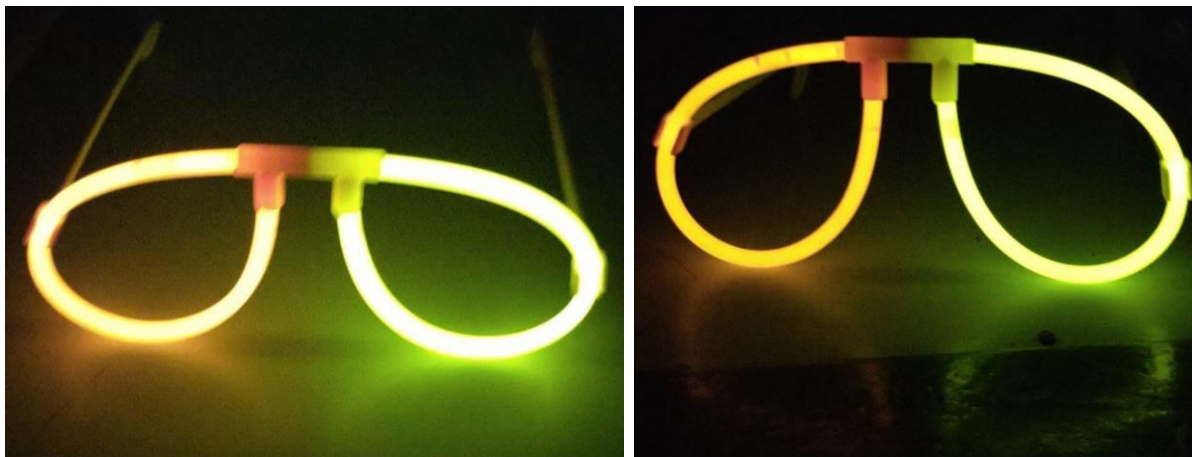
Tabela 1 – O fenômeno da luminescência é caracterizado quando certos tipos de substâncias emitem luz ao absorver energia, sem que ocorra o aumento da temperatura. A luminescência é um fenômeno bem abrangente e é obtida sob diversas fontes de excitação.

Fenômeno de luminescência	Métodos de excitação
Bioluminescência	Energia bioquímica
Sonoluminescência	Ondas sonoras
Eletroluminescência	Campo elétrico
Quimiluminescência	Energia química
Triboluminescência	Energia mecânica
Catodoluminescência	Elétrons ou raios catódicos
Radioluminescência	Radiação nuclear ou radiação ionizante
Termoluminescência	Radiação ionizante
Fotoluminescência: Fluorescência Fosforescência	Absorção de luz (fótons)

Fonte: Traduzida da ref. [23,24].

Embora os fenômenos de fotoluminescência, que serão explorados em mais detalhes na próxima seção, sejam os mais comuns e mais estudados, os demais são igualmente fascinantes. A existência de moléculas em estado excitado implica na absorção prévia de energia ou na geração dessas moléculas durante uma reação química; nesse caso, o processo é denominado "quimiluminescência" (Figura 7) [26]. Quando as reações quimiluminescentes acontecem nos seres vivos, adota-se o termo "bioluminescência" [26].

Figura 7 – Óculos feito com pulseiras neon (*glow stick*) emitindo luz. Nestes dispositivos, a quebra de uma ampola interna libera uma substância química, muitas vezes peróxido de hidrogênio, que reage com um corante fluorescente, resultando na emissão de luz visível enquanto houver reação.



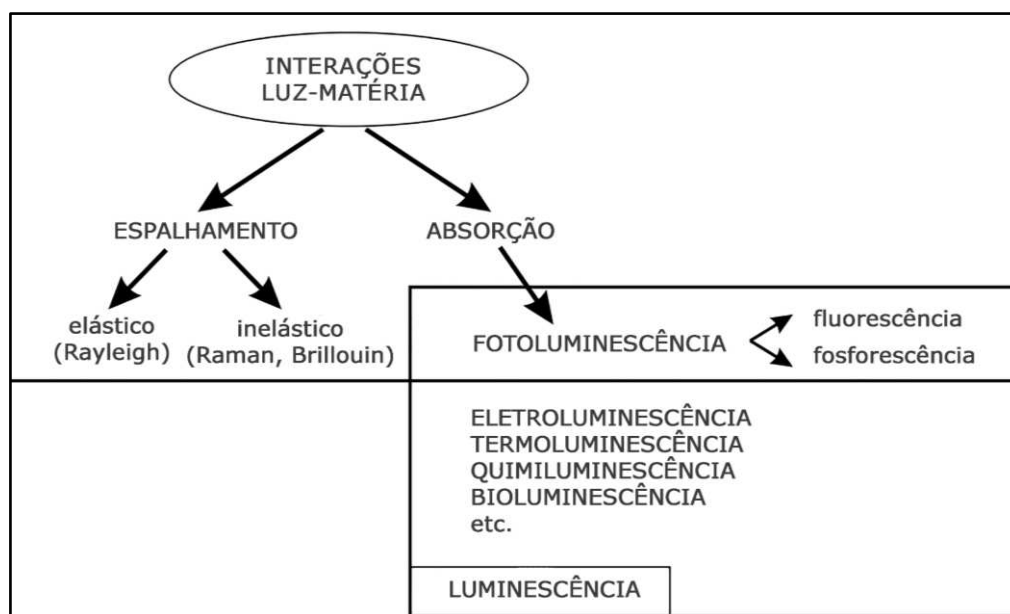
Fonte: Próprio Autor.

No restante dos processos luminescentes, também é requerida uma absorção de energia antes da emissão. A classificação e denominação desses processos dependem da natureza da fonte de energia excitadora. "Fotoluminescência" refere-se às radiações eletromagnéticas, geralmente ultravioletas ou visíveis [22-26]. "Radioluminescência" refere-se às radiações mais energéticas e, portanto, de menor comprimento de onda, como os raios X [26]. "Triboluminescência" está relacionada às radiações que acontecem depois da aplicação de energia mecânica, fricção ou pulverização [26]. "Eletroluminescência" ocorre no caso de energia associada a campos elétricos ou magnéticos [26]. "Sonoluminescência" ocorre quando a excitação se deve a ondas sonoras [26]. "Catodoluminescência" refere-se à emissão depois do bombardeio com elétrons acelerados [26]. "Termoluminescência", também conhecida como luminescência termicamente estimulada ou relaxamento estimulado termicamente [23], é uma particularidade em que um material emite luz ao ser aquecido após ter sido previamente exposto à radiação [26].

Fluorescência e fosforescência são casos particulares de luminescência denominada fotoluminescência, pois o modo de excitação é a absorção de fótons, levando a espécie absorvente a um estado eletrônico excitado. A desexcitação pode ser acompanhada por emissão de luz, que é um dos possíveis efeitos físicos resultantes da interação da luz com a matéria, como ilustrado na Figura 8 [22-24]. Nesse

projeto nos ateremos aos processos de absorção e fotoluminescência, que serão discutidos em mais detalhes na próxima seção.

Figura 8 – Principais processos físicos relacionados à interação da luz com a matéria. Destaque para Fluorescência e fosforescência que são casos particulares de luminescência denominada fotoluminescência, pois o modo de excitação é a absorção de fótons.



Fonte: Traduzida da referência [24].

A primeira observação de fluorescência em uma solução foi relatada por John Frederick William Herschel (1792 - 1871) em 1845 [22]. Herschel analisou uma solução de quinino (sulfato de quinina) dissolvido em ácido tartárico e um pouco de água. A solução de quinino, embora pareça perfeitamente transparente e incolor, exibe, sob certos comprimentos de onda, uma bela cor azul-celeste extremamente viva e bonita. Herschel expôs a solução a uma intensa luz solar e, olhando perpendicularmente para dentro da solução, observou que o fenômeno ocorria principalmente para a superfície do líquido. Para uma melhor análise, ele despejou o líquido em outro recipiente e percebeu que esse “filme” mais fino do líquido era tão eficaz em produzir essa cor azul quanto uma espessura considerável da solução. Herschel reconheceu a presença de um fenômeno incomum que não poderia ser explicado pelo conhecimento científico da época e, até hoje, a fluorescência do quinino continua sendo um dos exemplos mais usados e mais bonitos de fluorescência [22].

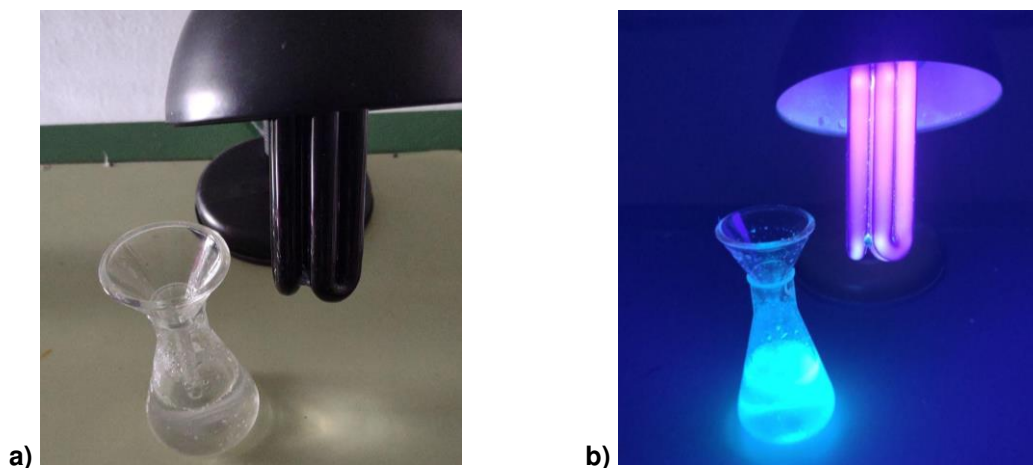
O fenômeno da fluorescência exibe várias características gerais e o Desvio Stokes é um dos principais. O Desvio Stokes se caracteriza pelo fato de que, para a

maior parte dos materiais, o comprimento de onda de máxima absorção é diferente do comprimento de onda de máxima emissão. A energia da emissão é tipicamente menor que a da absorção e, assim, a fluorescência normalmente ocorre em energias mais baixas ou comprimentos de onda maiores, como observado por George Gabriel Stokes (1819 - 1913), em 1852, na Universidade de Cambridge. Além disso, quanto maior é Desvio Stokes, maior é a perda de energia por processos não radiativos [22,25].

As primeiras experiências de G. Stokes foram realizadas com uma instrumentação relativamente simples. A fonte de excitação ultravioleta foi fornecida pela luz solar e foi usado um filtro de vidro, que fazia parte de um vitral [22]. Esse filtro transmitia seletivamente a luz abaixo de 400 nm, que era absorvida pela solução de quinino. Quando ele moveu uma taça cheia de solução de quinino pela parte visível do espectro, nada aconteceu, e a solução permaneceu transparente. Mas além da porção violeta do espectro, isto é, na zona invisível correspondente à radiação ultravioleta, a solução brilhou com uma luz azul [22,25]. Segundo sua interpretação, a solução de quinino é incolor porque não absorve na região do visível, mas ao absorver no ultravioleta, a solução se torna azulada. A cor azul vem apenas da região perto da superfície porque a solução de quinino concentrado absorve todo o UV nos primeiros milímetros [22].

A fluorescência da quinina ocorre perto de 450 nm, em um tom azulado, sendo de fácil visualização [22]. A partir de seus experimentos com uma ampla gama de substâncias, Stokes concluiu que a luz dispersa sempre tinha comprimentos de onda maiores do que a luz incidente. Mais tarde, esta declaração tornou-se a lei de Stokes [25]. Um exemplo notável de fluorescência ocorre quando a radiação emitida por uma lâmpada fluorescente, que produz luz na faixa do ultravioleta (UV) - popularmente conhecida como luz negra -, incide sobre a água tônica. A Figura 9 destaca esse efeito da fluorescência em um tom azulado da água tônica devido à quinina, substância utilizada na fórmula da bebida para atribuir um sabor amargo característico. De forma geral, podemos definir a fluorescência como um processo luminescente que persiste apenas enquanto a excitação é mantida, mantendo a sua multiplicidade de *spin*, como discutiremos mais adiante [22].

Figura 9 – a) Água tônica e uma lâmpada de luz negra, que emite radiação ultravioleta. b) A fluorescência da água tônica é percebida em um tom azulado devido à quinina, substância utilizada na fórmula da bebida.



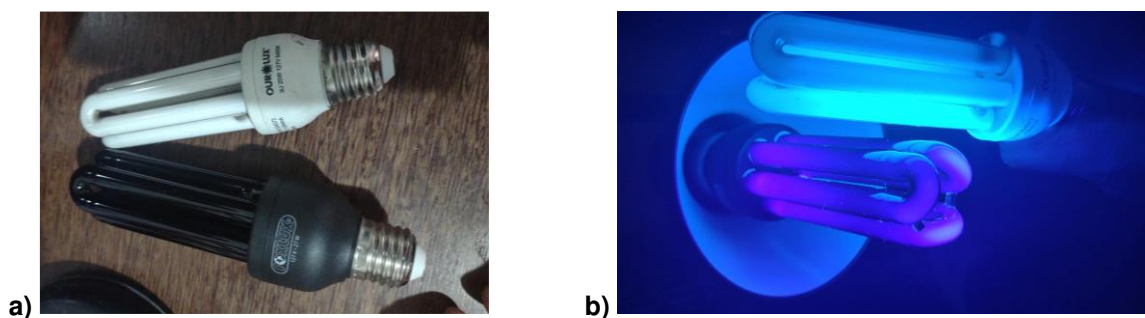
Fonte: Próprio Autor.

Outro exemplo típico do cotidiano é a lâmpada fluorescente. O tubo fluorescente foi uma das aplicações mais antigas da fluorescência [25]. O tubo de vidro é coberto com um material luminescente, que é excitado com radiação ultravioleta gerada pela ionização do gás argônio e do vapor de mercúrio confinados no seu interior, emitindo, na desexcitação, luz visível [16]. Em contraste com a incandescência, a fluorescência e a fosforescência não requerem altas temperaturas e geralmente não produzem calor perceptível. Tais emissões foram denominadas luz fria por este motivo [25]. Uma lâmpada fluorescente é mais eficiente na conversão da energia elétrica em luz do que uma lâmpada incandescente, portanto mais econômica [16]. Na Figura 10 vemos uma lâmpada fluorescente desligada sendo iluminada por uma lâmpada tipo luz negra. A lâmpada desligada está brilhando por causa do seu recobrimento interno de material luminescente, que fluoresce na região do visível quando excitado pela luz ultravioleta [16].

Por outro lado, a fosforescência é uma luminescência que envolve uma mudança na multiplicidade de *spin*, observável mesmo após a remoção da fonte excitante. Mesmo quando a exposição à luz é cessada, algumas substâncias fosforescentes brilham por até vários segundos enquanto os elétrons excitados retornam lentamente ao estado fundamental [22-24]. Como exemplo de materiais fosforescentes temos alguns adesivos "que brilham no escuro", como ilustrados na

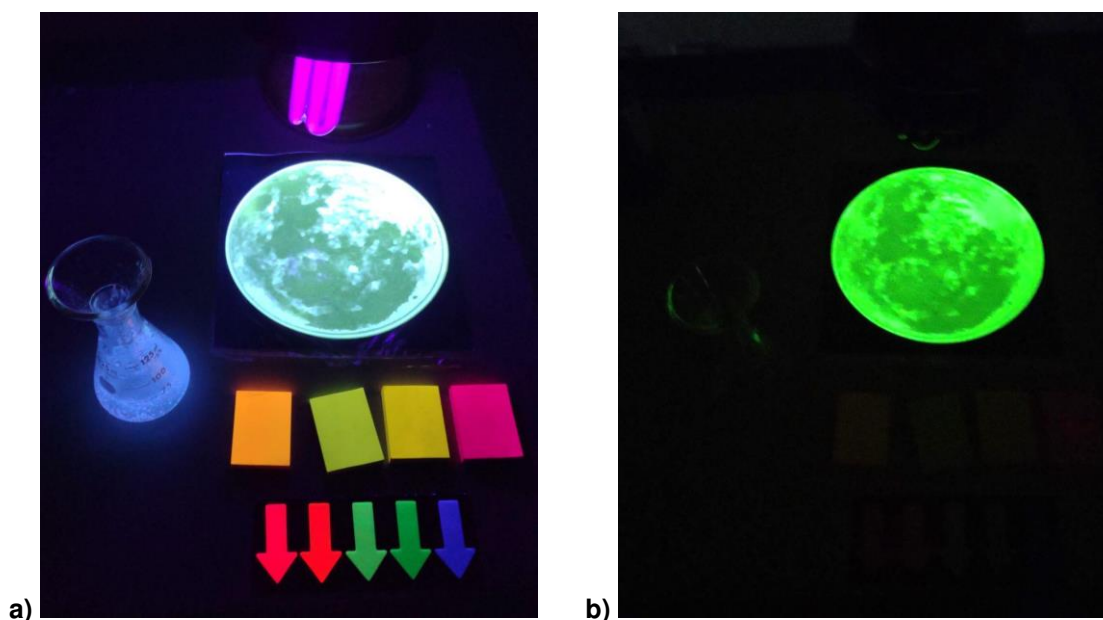
sequência de fotos da Figura 11, que retratam a diferença entre a fosforescência e a fluorescência.

Figura 10 – a) Lâmpada fluorescente e lâmpada de luz negra desligadas. **b)** Lâmpada fluorescente desligada brilhando devido à excitação externa promovida por uma lâmpada de luz negra, que emite luz na faixa do ultravioleta (UV) quando ligada.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 11 – a) Luminescência de vários objetos submetidos a radiação UV de uma a lâmpada do tipo Luz negra. **b)** Destaque para os materiais fluorescentes e o adesivo em formato de lua que é constituído de uma substância fosforescente. A fosforescência é uma luminescência observável mesmo após a remoção da fonte excitante.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 11.a, papéis de nota e marca páginas tipo *Post it* de várias cores, um frasco *erlenmeyer* com água tônica e um adesivo em formato de lua estão submetidos a radiação de uma lâmpada de luz negra. Nota-se que esses objetos apresentam

luminescência. Na Figura 11.b a luz negra é apagada, ou seja, a excitação é cessada, e apenas o adesivo em formato de lua permanece emitindo radiação. Com essa demonstração conclui-se que apenas o adesivo em formato de lua é constituído de uma substância fosforescente e que os outros materiais são constituídos de substâncias fluorescentes.

3.2.2. Fotoluminescência

Nesta seção abordaremos a luminescência utilizando alguns conceitos relacionados à física moderna e física quântica. Caso o leitor apresente alguma dúvida referente a algum conceito ou formalismo matemático, recomendamos uma revisão desses tópicos na literatura. Como sugestão, o livro “Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas”, dos autores EISBERG, R. M. e RESNICK, R., presente na referência [17], é uma boa opção.

Luminescência é a emissão de luz de qualquer substância e ocorre a partir de estados eletronicamente excitados [22]. No caso da fotoluminescência, que pode ocorrer em fases gasosas, líquidas e sólidas, uma substância absorve luz (fótons) de comprimento de onda λ_1 , decaindo de forma não radiativa do estado excitado, para um estado eletrônico excitado de menor energia e, em seguida, emite luz de comprimento de onda λ_2 , decaindo para o estado eletrônico fundamental [23].

A fotoluminescência de uma espécie molecular é diferente da emissão de uma espécie atômica. No caso de emissão atômica, tanto a excitação quanto a emissão estão aproximadamente nos comprimentos de onda de ressonância, onde $\lambda_1 \approx \lambda_2$. Em contraste, a excitação de uma espécie molecular geralmente resulta em uma emissão que tem um comprimento de onda maior que o comprimento de onda de excitação, ou seja, o fóton emitido tem menor energia que o fóton absorvido, dando origem ao já mencionado Desvio de Stokes [23].

As bandas de luminescência podem ser de fluorescência ou de fosforescência. Durante muito tempo a distinção entre fluorescência e fosforescência baseava-se na duração da emissão após o fim da excitação: a fluorescência era considerada como uma emissão de luz que desaparece simultaneamente com o fim da excitação, enquanto na fosforescência a luz emitida persiste após o fim da excitação. Mas tal critério é insuficiente porque existem fluorescências de longa duração (por exemplo,

sais de európio divalentes) e fosforescências de curta duração (por exemplo, luminescência violeta do sulfeto de zinco) cujas durações são comparáveis (várias centenas de nanossegundos) [25].

A condição usual para observar a fosforescência é que a espécie excitada passe por um estado intermediário antes da emissão, mais precisamente a multiplicidade de *spin* é mantida no caso da fluorescência, enquanto a fosforescência envolve uma mudança na multiplicidade de *spin*, normalmente de tripleto (elétrons desemparelhados) para singleto (elétrons emparelhados) ou vice-versa [25]. A multiplicidade de *spin* é o número de orientações possíveis, calculadas como $2S + 1$, do momento angular de *spin* correspondente a um determinado número quântico de *spin* total (S), para a mesma função de onda eletrônica espacial. Um estado de multiplicidade singleto tem $S = 0$ e $2S + 1 = 1$. Um estado de multiplicidade tripleto tem $S = 1$ e $2S + 1 = 3$ [25].

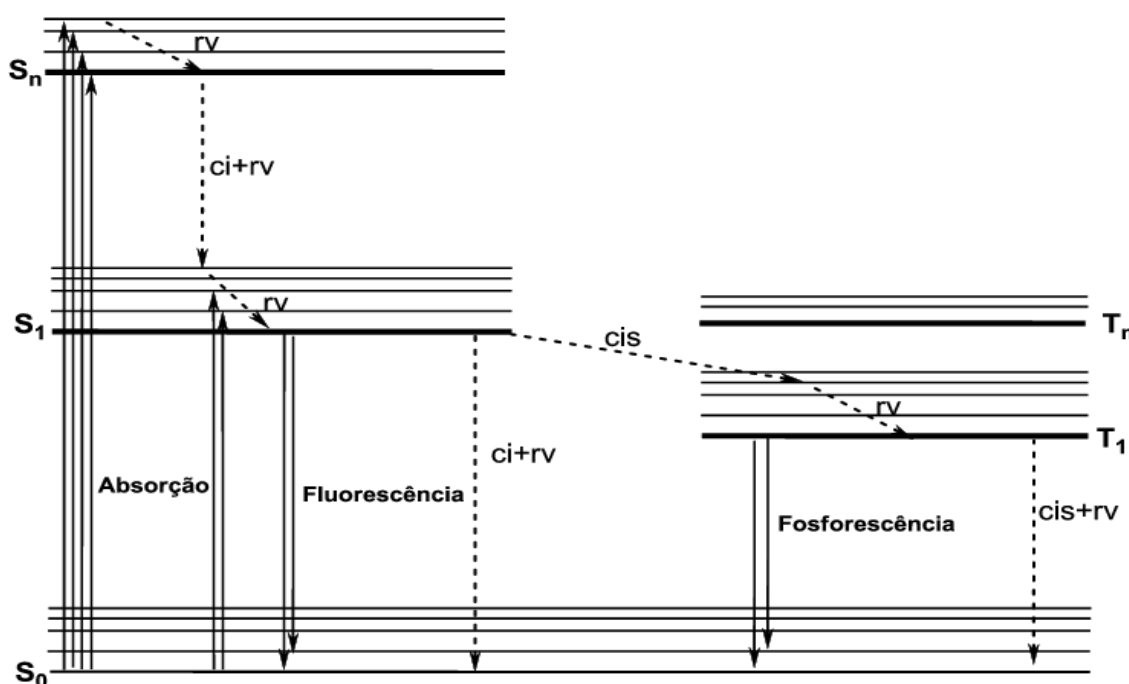
O estado eletrônico fundamental é normalmente um estado singleto e é designado como S_0 . Estados eletrônicos excitados são estados singletos (S_1, S_n) ou estados tripletos (T_1, T_n) [23]. Quando a molécula absorve a luz, um elétron é promovido do estado eletrônico fundamental para um estado excitado que possui a mesma multiplicidade de *spin*. Esta regra de seleção pode ser “relaxada” devido à interação *spin*-órbita que faz com que o número quântico de *spin* não seja mais um bom número quântico (os *spins* se misturam), tornando possível a fosforescência [23]. Uma infinidade de processos radiativos e não radiativos geralmente ocorre após a absorção de luz [22-24].

No caso de moléculas, estruturas orgânicas, o processo de fotoluminescência pode ser representado num diagrama de energia, conhecido como diagrama de Jablonski [22,23]. Esse diagrama, representado na Figura 12, ilustra as transições radiativas e não radiativas que levam à observação da fotoluminescência molecular.

Os processos de relaxamento não radiativos são aqueles que não emitem radiação e são classificados em conversão interna, conversão intersistemas, relaxação vibracional e desexcitação não-radiativa [22,23]. No relaxamento vibracional os átomos e moléculas excitados normalmente relaxam rapidamente até o nível vibracional mais baixo do estado eletrônico excitado ao qual se encontram. Ele ocorre

em um tempo muito mais curto que o tempo de vida típico da luminescência e, portanto, acontece antes da luminescência [22,23]. Se os átomos e moléculas são excitados para um estado singlete excitado de energia mais alta que S_1 , um relaxamento não-radiativo rápido geralmente ocorre para o menor estado singlete excitado (S_1) [22,23].

Figura 12 – Diagrama de Jablonski indicando os processos de absorção, fluorescência, fosforescência, conversão interna (ci), conversão intersistemas (cis) e relaxação vibracional (rv). As setas a cheio indicam os processos radiativos e as setas a tracejado indicam os processos não radiativos.



Fonte: Retirada da ref. [27].

Esses processos de relaxamento entre estados eletrônicos de mesma multiplicidade de *spin* são chamados de conversão interna. No diagrama de Jablonski da Figura 12 é ilustrado a conversão interna do estado excitado S_n para o estado excitado S_1 . Processos de relaxamento não radiativos também podem ocorrer entre estados excitados de diferentes multiplicidades de *spin*. Esse processo de relaxamento é conhecido como conversão intersistema. A relaxação do estado excitado S_1 (singlete) para o estado excitado T_1 (triplete) no diagrama de Jablonski da Figura 12 é um exemplo de conversão intersistema [22,23].

É possível que o sistema decaia para o estado fundamental por meio de processos não radiativos. Esse tipo de decaimento é chamado de desexcitação não

radiativa. A quantidade de energia liberada na forma de calor nesses processos é muito pequena e, geralmente, não pode ser medida experimentalmente. Em materiais sólidos luminescentes, as vibrações do cristal (fônons) fornecem o mecanismo para desexcitação não-radiativa [22,23].

A emissão de luz associada a uma transição radiativa de um estado eletrônico excitado que possui a mesma multiplicidade de *spin* do estado eletrônico fundamental é a denominada fluorescência, representada pela transição radiativa $S_1 \rightarrow S_0$ no diagrama de Jablonski da Figura 12. Como as transições de fluorescência são permitidas, elas ocorrem muito rapidamente de modo que o tempo de vida típico da fluorescência é próximo de 10 ns ($10 \cdot 10^{-9} s$) [22].

O rendimento quântico, número de fótons emitidos em relação ao número de fótons absorvidos, é uma característica importante na Luminescência. Substâncias com os maiores rendimentos quânticos exibem geralmente as emissões mais brilhantes. A intensidade da fluorescência pode ser diminuída por uma ampla variedade de processos. Essas diminuições de intensidade são chamadas de extinção. Por exemplo, a extinção pode ocorrer quando a substância em um estado excitado tem sua fluorescência desativada pelo contato com alguma outra molécula em solução, que é chamada de inibidor [23].

Por fim, as transições eletrônicas entre os estados de diferentes multiplicidades de *spin* são proibidas, no entanto, elas se tornam mais prováveis quando o acoplamento *spin* órbita aumenta. O resultado líquido do acoplamento *spin* órbita é a mistura dos estados excitados singleto e tripleto. Essa mistura remove a natureza proibitiva das transições eletrônicas entre os estados de singleto e tripleto [22,23]. Portanto, se o cruzamento intersistema preencher o estado excitado por tripleto, a luminescência pode ocorrer do estado tripleto ao estado fundamental, resultando na fosforescência que possui uma multiplicidade de *spin* diferente daquela do estado eletrônico fundamental [22,23]. A transição radiativa $T_1 \rightarrow S_0$, no diagrama de Jablonski da Figura 12 representa a fosforescência. Uma vez que as transições de fosforescência são proibidas, elas ocorrem mais lentamente [22-24].

Edmond Becquerel (1820-1891), grande entusiasta por vários aspectos da luz, teve como contribuição mais importante seus estudos sobre o tempo de vida da

fosforescência [25]. Ele foi pioneiro nessa área e mediu os tempos de decaimento da fosforescência de vários compostos por meio de um experimento de fotoluminescência resolvido no tempo. Para a descrição dos decaimentos experimentais da fosforescência, no caso dos sólidos inorgânicos, os melhores ajustes foram obtidos com a seguinte equação [25]:

$$i^2(t + c) = c, \quad (3.8)$$

em que i é a intensidade normalizada de modo que $i(0) = 1$, t é o tempo e c é uma constante de tempo. Mais tarde, ele propôs uma equação mais geral na forma:

$$i^m(t + c) = c, \quad (3.9)$$

sendo $1 \geq m \geq 1/2$ [25]. Ele obteve bons ajustes para sulfetos alcalino-terrosos. A Equação (3.9) pode ser reescrita como:

$$i(t) = \frac{1}{(1+t/c)^{1/m}}. \quad (3.10)$$

Como m é menor que 1, esta função decai mais rapidamente do que uma hipérbole (para a qual $m = 1$) e pode, portanto, ser chamada de hipérbole comprimida [25]. Devido aos estudos pioneiros de Becquerel esta função é chamada de lei de decaimento de Becquerel. Os estudos de Becquerel sobre a fosforescência natural das substâncias ligadas aos raios-X contribuíram para a descoberta da radioatividade. Atualmente, esta função é de grande interesse na análise de decaimentos complexos de luminescência com distribuições subjacentes de tempos de decaimento [25].

A fosforescência também é conhecida como “fluorescência retardada” e o seu tempo de vida é normalmente de microssegundos a segundos [23,25]. O esquema da Figura 13 ilustra a ordem de grandeza de tempos característicos dos fenômenos presentes na luminescência.

Figura 13 – Ordem de grandeza de tempos característicos dos fenômenos presentes na luminescência. Destaque para fluorescência e para fosforescência. A fosforescência também é conhecida como “fluorescência retardada” e o seu tempo de vida é normalmente de microssegundos a segundos

TEMPOS CARACTERÍSTICOS		
ABSORÇÃO	10^{-15} s	
RELAXAMENTO VIBRACIONAL	10^{-12} s – 10^{-10} s	
VIDA ÚTIL DO ESTADO EXCITADO S_1	10^{-10} s – 10^{-7} s	⇒ FLUORESCÊNCIA
CRUZAMENTO INTERSISTEMA	10^{-10} s – 10^{-8} s	
CONVERSÃO INTERNA	10^{-11} s – 10^{-9} s	
VIDA ÚTIL DO ESTADO EXCITADO T_1	10^{-6} s – 10^0 s	⇒ FOSFORESCÊNCIA

Fonte: Traduzido da ref. [24].

A luminescência constitui um campo de estudo abrangente e de significativa importância em diversas áreas das ciências naturais. Sua descrição completa engloba aspectos muito mais abrangentes do que os que apresentamos neste trabalho. Caso o leitor tenha interesse em aprofundar nesse assunto, recomendo os livros "*Principles of Fluorescence Spectroscopy*" do autor LAKOWICZ, J. R.; presente na referência [22] e "*Molecular Fluorescence*"; do autor BERNARD, V., presente na referência [24]. O artigo "*A Brief History of Fluorescence and Phosphorescence before the Emergence of Quantum Theory*"; também do autor BERNARD, V., é uma boa opção para iniciar os estudos sobre esse tema. O artigo está disponível no *link* disponibilizado na referência [25].

3.3. Espectrômetros

Um espectrômetro separa uma fonte de luz de entrada em seus componentes espectrais, enquanto mede a intensidade de luz emitida por uma substância em uma ampla faixa espectral [28]. É amplamente utilizado para análise espectroscópica de materiais. No caso dos espectrômetros ópticos, os mesmos têm como função medir a interação (absorção, reflexão, espalhamento) da radiação eletromagnética com uma amostra, e/ou a emissão (fotoluminescência) da radiação eletromagnética. Sua finalidade é, portanto, analisar a composição de um feixe luminoso.

Normalmente são utilizadas redes de difração ou prismas para decompor a luz e a análise pode ser baseada nos fenômenos de dispersão e/ou de interferência. O espectro resultante, geralmente representado como um gráfico da intensidade da

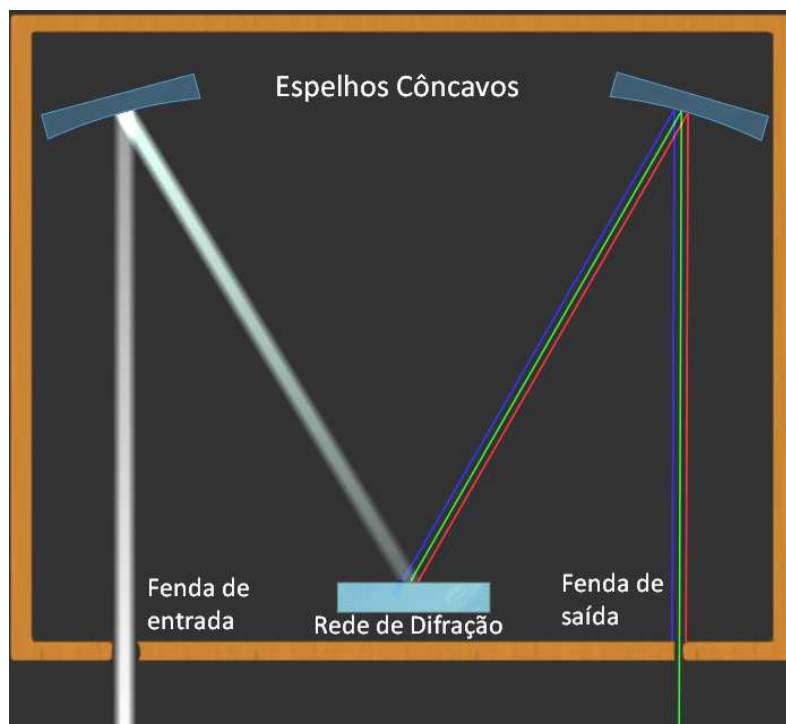
decomposição da luz pelo comprimento de onda, frequentemente exibe uma série de picos que funcionam como uma espécie de "assinatura" ou "impressão digital" da substância em análise. Dessa maneira, um espectrômetro é um instrumento muito importante utilizado na investigação da composição molecular e atômica das substâncias. Com esse instrumento pode-se caracterizar uma série de materiais quanto à sua absorção luminosa, fluorescência, espalhamento de luz entre outros fenômenos [28]. Além disso, os espectrômetros desempenham um importante papel na astronomia, sendo utilizados para analisar a composição química de estrelas e planetas, entre outros usos.

Atualmente, grande parte dos espectrômetros comerciais utilizam *lasers*, de variados comprimentos de onda, como fonte de excitação das substâncias a serem analisadas. Nos espectrômetros que também possuem a opção de se fazer outras medidas como, por exemplo, absorção, transmissão e reflexão, são mais comumente utilizadas lâmpadas com espectros de emissão bem definidos para excitar os materiais. Nesse caso são utilizados monocromadores, um arranjo óptico com o intuito de selecionar um determinado comprimento de onda. Vale ressaltar que, antes da invenção do *laser*, os monocromadores eram usados para selecionar comprimentos de ondas das fontes de excitações [28].

Um monocromador é essencialmente constituído por uma fenda de entrada, uma fenda de saída e um elemento dispersivo que pode ser uma rede de difração ou um prisma. Além disso, o monocromador pode conter lentes ou espelhos para otimizar seu funcionamento. Em essência, um monocromador é um tipo de espectrômetro. Geralmente, ele possui um mecanismo para direcionar o comprimento de onda de interesse para uma fenda de saída [28].

A Figura 14 apresenta um exemplo de monocromador constituído por uma rede de difração. A movimentação da rede de difração seleciona o comprimento de onda na fenda de saída. Nesse exemplo, o monocromador recorre a espelhos para coletar a luz da fenda de entrada e focalizar a luz na fenda de saída, aumentando assim sua eficiência [28]. A fenda de entrada é posicionada no foco do primeiro espelho que reflete a imagem da fenda sobre a rede de difração. O segundo espelho coleta a luz difratada e a focaliza no plano da fenda de saída, projetando imagens da fenda de entrada em posições diferentes para comprimentos de onda diferentes.

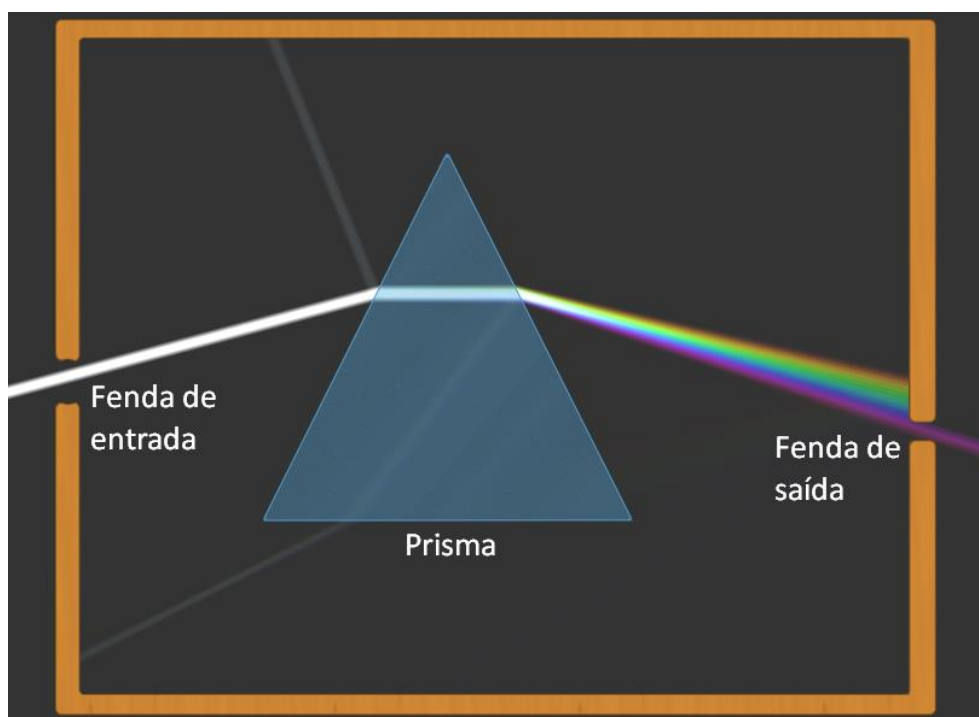
Figura 14 – Exemplo de um monocromador constituído por uma rede de difração e espelhos côncavos. A movimentação da rede de difração seleciona o comprimento de onda na fenda de saída.



Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*, ref. [29].

Outro exemplo de monocromador é apresentado na Figura 15, agora um monocromador prismático. Devido a incidência oblíqua da luz na superfície do prisma e a mudança de meio, ocorre a dispersão da luz branca em suas cores componentes, formando um espectro ^[16]. Para esse tipo de monocromador, a movimentação do prisma é responsável por selecionar o comprimento de onda na fenda de saída. Em ambos os monocromadores, a abertura das fendas é importante, pois, juntamente ao elemento dispersivo, são responsáveis pela resolução do monocromador.

Figura 15 – No monocromador prismático, a movimentação do prisma é responsável por selecionar o comprimento de onda na fenda de saída.



Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*, ref. [29].

Geralmente, para a medida de fluorescência, a luz, proveniente da amostra, após ser excitada por uma fonte, *laser* ou lâmpada, entra no espectrômetro através de uma fenda estreita. A largura da fenda determina a intensidade de luz que entra no espectrômetro e define a resolução do mesmo, como já mencionado. O próximo componente, um dos mais importantes, é a rede de difração, que consiste basicamente em um substrato com muitos sulcos paralelos gravados e revestidos com um material altamente refletor. A luz dispersa na grade de difração é, então, direcionada por espelhos ou lentes para um fotodetector, ou uma matriz de detectores, localizados no ponto ou plano de imagem ^[28]. A seguir vamos destacar alguns desses componentes principais dos espectrômetros.

3.3.1. *Laser*

Atualmente o *laser* é uma das principais fontes de luz em técnicas espectroscópicas. O *laser*, abreviação em inglês de “*Light Amplification by Stimulated*

Emission of Radiation” que, em tradução literal, significa Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação, é um dispositivo que, como o nome sugere, faz uso do fenômeno da emissão estimulada. Como vimos, Albert Einstein, em sua interpretação da teoria de Max Planck, conclui que a luz é formada por pacotes discretos e bem determinados de energia denominados *quanta* de luz, também chamados de fótons. A energia do fóton é proporcional a constante de Planck multiplicada pela frequência, dada pela equação (3.6) ^[18].

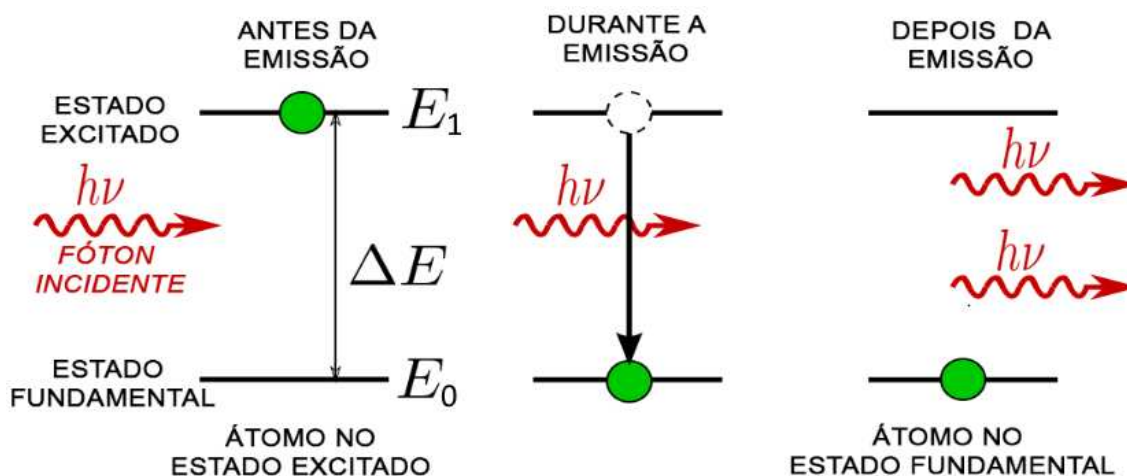
Átomos, íons e moléculas podem existir somente em estados discretos de energia. A mudança de um estado para outro (chamada de transição) está associada com a emissão e a absorção de um fóton. Fótons com o comprimento de onda correto podem fazer com que um elétron salte do nível de energia mais baixo para o mais alto. A absorção de um fóton se dá quando um sistema, que está no estado fundamental, E_0 , é exposto à radiação externa e sofre uma transição para um estado excitado, E_1 , como relacionado na equação (3.11)

$$h\nu_{10} = E_1 - E_0 , \quad (3.11)$$

em que ν_{10} é a frequência da radiação emitida/absorvida.

Já se sabia que um elétron ao absorver um fóton o reemite ao acaso após certo tempo (emissão espontânea). Einstein descobriu, por meio de considerações teóricas, que este mesmo elétron deve reemitir seu fóton absorvido se um segundo fóton, idêntico ao absorvido, interagir com ele (emissão estimulada), como ilustrado na Figura 16. O fóton causador da perturbação não é destruído e o segundo fóton é emitido com a mesma fase, frequência, polarização e direção do fóton original ^[18]. Fazendo uso do fenômeno da emissão estimulada, o *Laser* gera um intenso feixe de luz monocromático, coerente e colimado (propaga-se como um feixe) sendo de suma importância em pesquisas científicas, estando presente em várias áreas da física e química, além de outras áreas ^[18].

Figura 16 - Na emissão estimulada, o fóton causador da perturbação não é destruído e o segundo fóton é emitido com a mesma fase, frequência, polarização e direção do fóton original.



Fonte: Adaptada e traduzida da ref. [30].

3.3.2. Redes de difração

Geralmente os espectrômetros são baseados em redes de difração. Elas são o “coração” dos espectrômetros por separarem espacialmente os diferentes comprimentos de onda presentes num feixe luminoso. O fenômeno da difração, comum a todos os tipos de ondas, é perceptível quando uma onda encontra um obstáculo ou uma fenda de tamanho comparável ao seu comprimento de onda. Para múltiplos obstáculos/fendas se tem um padrão complexo de intensidade variável devido ao fenômeno da interferência ^[16].

Os padrões de intensidade observados na difração podem ser explicados com base no princípio de Huygens, que diz que cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma fonte pontual para as frentes de onda posteriores. As ondas advindas de cada uma dessas fontes podem se sobrepor depois de percorrerem caminhos diferentes, gerando um padrão de máximos e mínimos, dependentes do comprimento de onda e dos parâmetros geométricos das fendas envolvidas no processo ^[16].

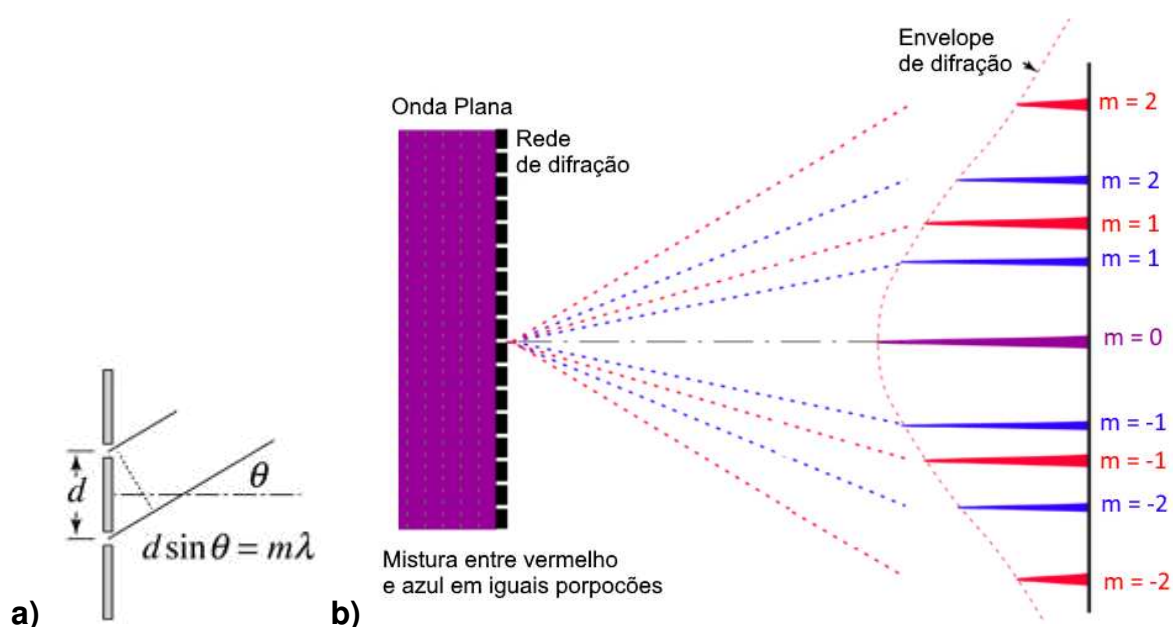
Uma grade ou rede de difração é constituída por inúmeras fendas paralelas, estreitamente espaçadas. Existem redes de difração por transmissão e também por reflexão e o número de ranhuras/fendas por milímetro é um determinante para a

resolução espectral. Sendo assim, a qualidade de uma grade de difração é controlada principalmente pelo número de ranhuras, por unidade de área, e pela precisão com que estas foram feitas [16]. A condição para intensidade máxima é a mesma que para a fenda dupla. Quando se tem um grande número de fendas, os máximos de interferência são intensos e estreitos, fornecendo alta resolução para aplicações espectroscópicas, de modo que a resolução dos máximos é proporcional ao número N de fendas/mm, enquanto suas intensidades aumentam com N^2 [16].

Considerando d , a distância entre duas fendas consecutivas, e θ , o ângulo entre a normal à rede de difração e a direção de observação, Figura 17.a, a condição para a ocorrência de máximos de interferência é dada pela Equação (3.12) a seguir:

$$d \sin \theta = m \lambda, (m = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (3.12)$$

Figura 17 – a) Condição para a ocorrência de máximos de interferência em que d é a distância entre duas fendas consecutivas e θ o ângulo entre a normal à rede de difração e a direção de observação. **b)** Separação dos comprimentos de onda (λ) de uma luz roxa por uma rede de difração por transmissão. Os vários máximos são referidos como de ordem zero, de primeira ordem etc., conforme o valor de m , sendo m chamado a ordem do máximo de difração.



Fonte: a) extraída da ref [31]; b) extraída e traduzida da ref. [31].

Isso significa que temos um máximo de intensidade em ângulos tais que a diferença de caminho entre os raios provenientes de fendas consecutivas seja de $m\lambda$. Os vários máximos são referidos como de ordem zero, de primeira ordem etc.,

conforme o valor de m , sendo m chamado a ordem do máximo de difração ^[16]. Para um feixe luminoso policromático, exceto para o máximo de ordem zero, as várias cores do feixe de luz se difratam em máximos de diferentes direções, já que o desvio da onda difratada depende do comprimento de onda λ . O resultado final é a decomposição do feixe de luz policromática em seus componentes monocromáticos, com uma separação bem nítida e uniforme, devido à interferência entre os feixes de diversas cores ^[16]. A ilustração da Figura 17.b demonstra, de uma forma qualitativa, a clara separação dos comprimentos de onda da luz por uma rede de difração por transmissão.

Existem várias ordens dos picos associados à interferência da luz através das múltiplas fendas. As intensidades desses picos são afetadas por um envelope de difração. Para $m = 0$, temos um máximo de ordem zero que é bastante intenso, porque todos os comprimentos de onda estão em fase nesse ponto do anteparo. Como $d \sin(\theta)$ é proporcional a λ e o maior comprimento de onda visível é o vermelho, para essa cor observamos que os máximos apresentam distanciamentos maiores do máximo central quando comparados aos máximos correspondentes do comprimento de onda azul. Já a intensidade diminui à medida que se afasta do máximo central, destacado pelo envelope de difração da Figura 17.b. Um raciocínio análogo vale para o azul, que tem comprimento de onda menor que o vermelho.

No cotidiano podemos citar os *CDs*, *DVDs* e discos *Blu-ray* que funcionam como uma rede de difração de reflexão (Figura 18).

Figura 18 – A superfície do *CD* apresenta um conjunto de finíssimas ranhuras (linhas) onde são feitas as gravações. Essas ranhuras funcionam como uma rede de difração, decompondo a luz solar em suas componentes.



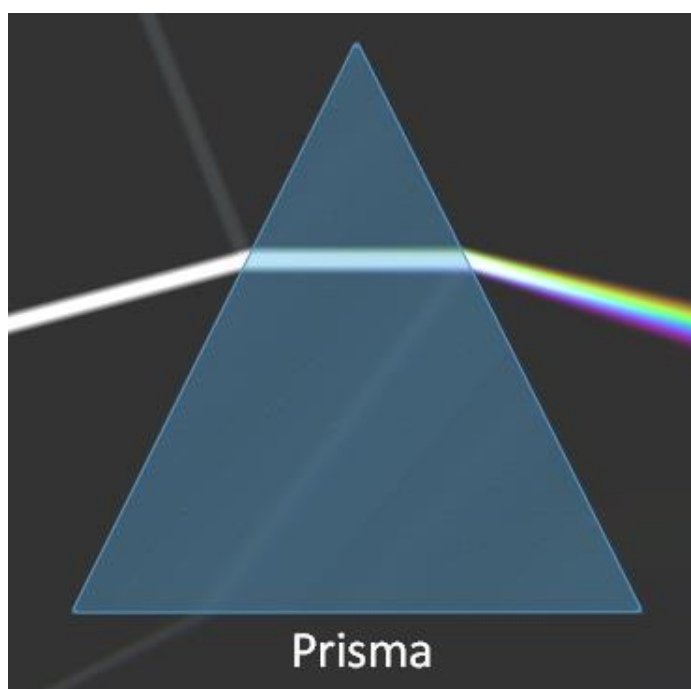
Fonte: Próprio Autor.

A superfície do *CD* apresenta um conjunto de finíssimas ranhuras (linhas) onde são feitas as gravações. Essas linhas agem como rede de difração para a reflexão das ondas luminosas que incidem na superfície do disco, decompondo-as em seus respectivos comprimentos de onda ^[16].

3.3.3. Prisma

O prisma é um instrumento óptico, frequentemente triangular, cujas superfícies são planas, polidas e transparentes. No caso da Figura 19 temos ilustrada a situação em que um feixe de luz branca incide sobre uma das faces de um prisma. Devido ao fenômeno da refração, essa luz branca é dispersa em suas cores componentes. A interface entre o ar e o prisma pode ser considerada um dioptro plano.

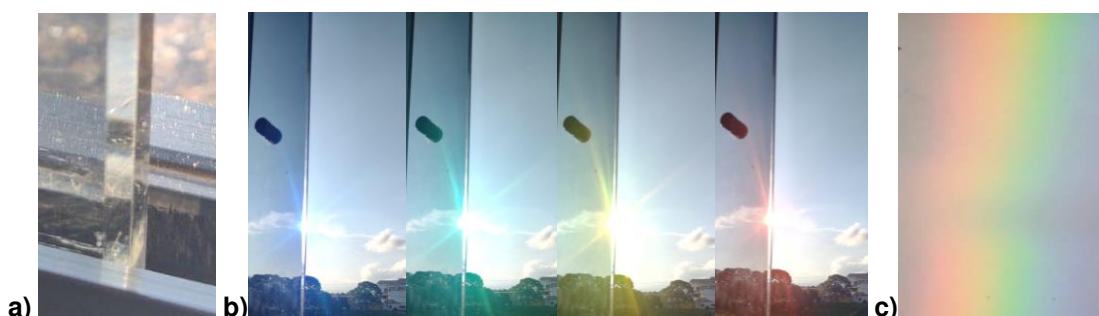
Figura 19 – Feixe de luz branca incidente sobre uma das faces de um prisma. Devido ao fenômeno da refração, essa luz branca é dispersa em suas cores componentes.



Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*, ref. [29].

Algumas janelas de casas e apartamentos apresentam vidros com acabamento prismático, o que resulta em um “arco-íris” em pontos da casa devido à dispersão da luz provocada por esse formato. A sequência de imagens da Figura 20 ilustra esse exemplo.

Figura 20 – **a)** Dispersão da luz branca ao incidir sobre uma janela com acabamento prismático. **b)** A câmera do celular foi posicionada e girada com suavidade para capturar a sequência de fotos do espectro de cores. **c)** Espectro formando um “arco íris” projetado na parede oposta a janela. **Observação:** É fundamental destacar a precaução ao observar ou fotografar diretamente o Sol. A exposição sem os devidos cuidados pode acarretar sérios problemas para a visão ou danificar a câmera do celular.



Fonte: Próprio Autor.

Um dióptro plano é uma interface lisa entre dois meios ópticos e os raios incidente, refletido e a normal à superfície no ponto de incidência estão sobre um mesmo plano ^[16]. Esse plano, chamado plano de incidência, é perpendicular ao plano da interface entre os dois materiais. Nesse caso, o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência para todos os comprimentos de onda e para qualquer par de materiais. Essa relação de igualdade entre os ângulos de incidência e reflexão é conhecida como lei da reflexão, e é um dos princípios básicos para espelhos planos, por exemplo ^[16].

Para o caso da refração, quando uma luz monocromática incide na interface do dióptro plano de índices de refração n_a e n_b , a razão entre o seno dos ângulos de incidência (θ_a) e refração (θ_b), em que os dois ângulos são medidos a partir da normal à superfície, é igual ao inverso da razão entre os dois índices de refração, matematicamente temos a relação:

$$n_a \text{sen} \theta_a = n_b \text{sen} \theta_b, \quad (3.14)$$

conhecida como lei de Snell-Descartes. Por meio dessa lei, podemos perceber que, mesmo havendo refração devido à mudança de meio óptico, só ocorre desvio (mudança de direção) quando a incidência é oblíqua em relação à superfície. Para incidências perpendiculares à superfície do dióptro, paralelos à reta normal, não se tem desvio na trajetória da luz ^[16]. Para incidências oblíquas da luz, o desvio produzido

pelo prisma se eleva com o aumento do índice de refração e frequência, ou com a diminuição do comprimento de onda da luz incidente. Assim, a luz violeta sofre o maior desvio e a luz vermelha é a que desvia menos; as demais cores sofrem desvios entre esses dois extremos ^[16].

Quando a luz emerge do prisma, ela se espalha e as cores são separadas ainda mais. Dizemos que a luz sofre dispersão e forma um espectro. A quantidade de dispersão depende da diferença entre o índice de refração da luz violeta e o índice de refração da luz vermelha.^[16] O índice de refração de um material óptico, designado pela letra n , é dado pela razão entre velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no material (v) ^[16]:

$$n = \frac{c}{v} . \quad (3.13)$$

A luz sempre se propaga mais lentamente através de um material do que no vácuo, portanto, o valor de n , em qualquer meio material, é sempre maior que 1. No vácuo, $n = 1$. Como n é a razão entre duas velocidades, ele é um número puro, sem unidades. Note que a velocidade da onda é inversamente proporcional ao índice de refração n . Quanto maior for o índice de refração de um material, menor será a velocidade de propagação da onda nesse meio ^[16]. Temos também que o índice de refração é inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz (combinação entre equações (3.6) e (3.13)). Quanto menor for o comprimento de onda da luz, maior será o índice de refração da luz para um determinado meio. Portanto, o índice de refração de um mesmo meio será maior para a luz violeta do que para a luz vermelha ^[32]. A luz branca comum é uma superposição de ondas cujos comprimentos abrangem todo o espectro visível. A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os comprimentos de onda, mas, no interior de um material, ela varia com o comprimento de onda. Portanto, o índice de refração de um material depende do comprimento de onda. A dispersão indica como a velocidade da onda e o índice de refração dependem do comprimento de onda ^[16].

A frequência da onda permanece inalterada ao atravessar diferentes materiais. Em outras palavras, o número de ciclos que ingressa por unidade de tempo é igual ao número que emerge por unidade de tempo. Isso decorre da observação de que uma superfície de transição não tem a capacidade de criar nem destruir uma onda ^[16]. Além

disso, o comprimento de onda da luz tende a variar ao passar de um material para outro. Isso ocorre porque, em qualquer material, a frequência permanece a mesma que no vácuo, mas a velocidade é sempre menor do que a velocidade da luz no vácuo, resultando em uma redução proporcional no valor do comprimento de onda. Dessa forma, o comprimento de onda da luz em um material (λ) é menor que o comprimento de onda da mesma luz no vácuo (λ_0), matematicamente ^[16]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (3.15)$$

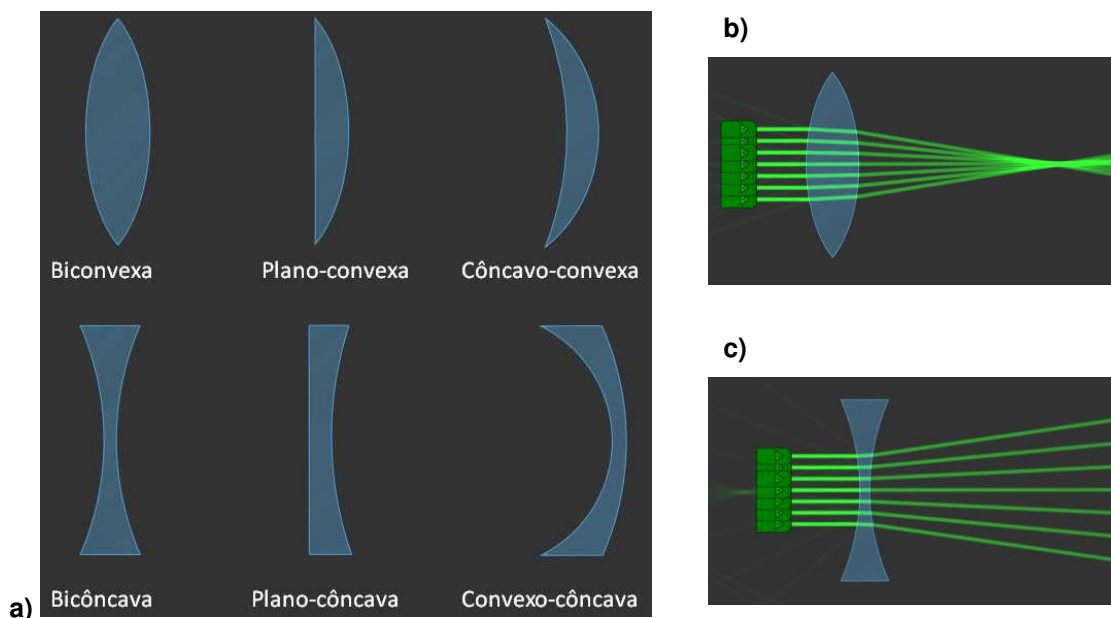
Assim, à medida que a velocidade da onda diminui, o comprimento de onda também diminui, enquanto, por outro lado, quando a velocidade aumenta, o comprimento de onda aumenta ^[16].

3.3.4. Lentes

As lentes têm um papel fundamental tanto nos espectrômetros como em diversos dispositivos que conhecemos, como câmeras fotográficas, óculos, projetores, lunetas e microscópios. Uma lente é um sistema óptico com duas superfícies refratoras. O mais comum são elas possuírem ambas as faces esféricas ou uma face esférica e outra plana. Há seis lentes esféricas possíveis, como ilustra a Figura 21.a, três são denominadas lentes de bordas finas (convexas) e as outras três, lentes de bordas espessas (côncavas) ^[32].

O comportamento óptico de uma lente esférica depende da curvatura de suas faces, dos índices de refração do material que a compõem e do índice de refração do meio onde ela está imersa. As lentes se baseiam no fenômeno de refração para desviar os raios de luz, sendo classificadas em convergentes ou divergentes. Em uma lente convergente, Figura 21.b, os raios paralelos ao eixo central convergem para o ponto focal real, situado do outro lado da lente. Por outro lado, numa lente divergente, Figura 21.c, os raios paralelos que atravessam a lente têm comportamento oposto, de forma que seus prolongamentos convergem para o ponto focal virtual ^[16]. Em ambos os casos o foco é simétrico em relação ao centro óptico da lente esférica. A linha horizontal que passa pelo centro da lente é chamada de eixo óptico e a distância medida a partir do centro da lente até o foco é chamada de distância focal ^[32].

Figura 21 – **a)** Representação esquemática dos tipos de lentes esféricas imersas no ar e seus comportamentos ópticos. **b)** Efeito de um feixe de luz ao incidir em uma lente convergente. **c)** Efeito de um feixe de luz ao incidir em uma lente divergente.



Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*, ref. [29].

Para lentes esféricas delgadas, a determinação da distância focal pode ser obtida pela equação (3.16), conhecida como Equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}, \quad (3.16)$$

em que f é a distância focal da lente, s é a distância do objeto à lente e s' a distância da imagem à lente esférica. A distância focal de uma lente convergente é uma distância positiva, e a lente também é chamada de lente positiva. Por outro lado, a distância focal de uma lente divergente é uma grandeza negativa, e a lente também é chamada de lente negativa. Como regra geral, qualquer lente mais espessa no centro que nas bordas é uma lente convergente com valor de f positivo; e qualquer lente mais fina no centro que nas bordas é uma lente divergente com valor de f negativo, desde que essas lentes estejam imersas em um material com índice de refração menor que o índice de refração do material da lente ^[16].

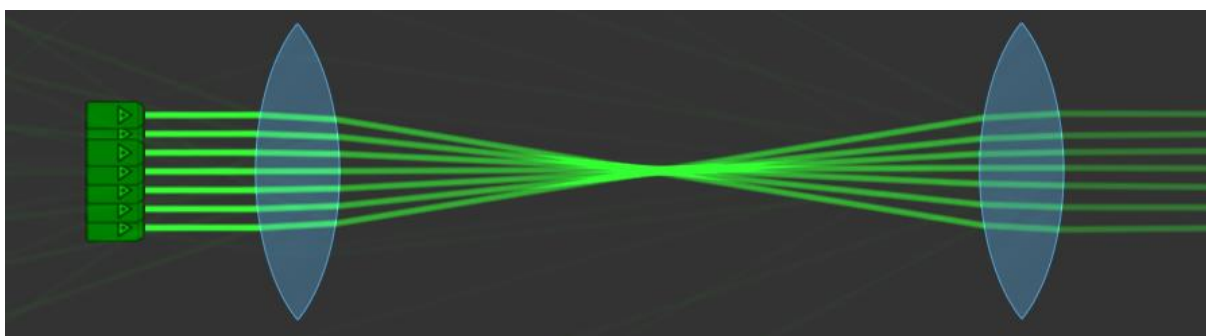
Outro ponto que vale destacar é a ampliação transversal (m) para as lentes esféricas delgadas fornecida pela equação (3.17):

$$m = \frac{-s'}{s}. \quad (3.17)$$

Uma lente com distância focal muito pequena fornece um ângulo de visão grande e, como a razão s'/s é pequena, um objeto distante fornece somente uma imagem pequena. Por outro lado, uma lente com distância focal muito grande fornece ângulo de visão pequeno e imagem grande de um objeto distante, portanto, quanto maior for a distância focal, menor será o ângulo de visão [16].

Outra aplicação das lentes é a colimação da luz. A colimação é o processo de tornar paralelas, com a maior precisão possível, as trajetórias de determinados feixes luminosos, ou seja, a colimação reduz a divergência de um feixe de luz [33]. A maneira mais simples de colimar um feixe de luz é usando uma única lente esférica. Quando as lentes são usadas para uma determinada aplicação, é importante levar em consideração a distância focal da lente, equação (3.17), e a distância entre a lente e o ponto onde se deseja que os raios se convertam ou se tornem paralelos. Quanto maior for a distância focal desta lente, maior será o diâmetro do feixe após a colimação [33]. Na Figura 22 pode ser observada a colimação de feixes *lasers* por duas lentes convergentes. A primeira lente focaliza os feixes *lasers*, e a segunda lente funciona como colimadora quando a distância entre essas duas lentes for $F_1 + F_2$, sendo F as respectivas distâncias focais de cada lente.

Figura 22 – Colimação de feixes lasers por duas lentes convergentes. A primeira lente focaliza os feixes lasers, e a segunda lente funciona como colimadora respeitando as distâncias focais das mesmas.



Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*, ref. [29].

Lentes convergentes concentram os raios de luz para convergir em um ponto focal. Se um feixe de luz se espalha, uma lente convergente pode ser usada para fazer com que os raios se tornem paralelos. Além disso, se um determinado ajuste de

feixe tem que ser feito, uma lente com uma distância focal negativa (divergente) e a outra com uma distância focal positiva (convergente) criam uma configuração para expandir ou encolher o feixe colimado ^[33].

4. METODOLOGIA

Dispositivos comerciais destinados à espectroscopia costumam ser dispendiosos e, muitas vezes, de difícil acesso para o ensino médio. Considerando esse contexto e visando incorporar a prática experimental ao ambiente da sala de aula, nessa seção discutimos a construção de um espectrômetro com materiais de baixo custo. A intenção é estimular, por meio do aparato construído, o interesse dos estudantes quanto a experimentação e em áreas como óptica e interação da luz com a matéria. Além disso, vamos discutir a metodologia de preparação de uma sequência didática fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e no Ciclo de Experiência Kellyana de George Kelly, bem como sua aplicação e coleta de dados por meio de questionários diagnósticos pré-testes e pós-testes.

4.1. Construção do espectrômetro

Artigos sobre a construção de espectrômetros podem ser encontrados em revistas de instrumentação e de ensino de ciências em diversos formatos e aplicações. Geralmente, são utilizados componentes eletrônicos que são empregados para gerar gráficos para análise espectroscópica. Caso o leitor tenha interesse em aprofundar nesse assunto, recomendo os seguintes trabalhos: “Um espectrofotômetro de baixo custo para laboratórios de ensino: aplicações no ensino da absorção eletrônica e emissão de fluorescência”, do autor LÜDKE, E., disponível na ref. [34] , “Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio” dos autores AZEVEDO, A. L., et al., disponível na ref. [35] e “Uma montagem experimental para a medida de fluorescência” dos autores PAVONII, J.F., et al., disponível na ref. [36].

O diferencial do espectrômetro construído neste trabalho está na simplicidade de sua montagem, sendo um dispositivo compacto e móvel, o que facilita sua utilização no ambiente escolar. Adicionalmente, ele aborda os princípios básicos da óptica, tais como as propriedades das lentes e a difração, que estão presentes nos currículos de física do ensino médio. A análise visual direta das cores do espectro de emissão no anteparo é intrigante, pois é comum, entre os estudantes, esperarem que apenas a cor do *laser* incidente seja observada devido à reflexão. No entanto, o aparato construído revela uma gama de cores adicionais, o que ajuda a elucidar os

princípios fundamentais da fluorescência, em que os comprimentos de onda de emissão são maiores do que os de absorção.

Nesta seção descreveremos os materiais e os procedimentos necessários para a construção do espectrômetro. Os detalhes dos materiais, seus preços aproximados e o passo a passo da montagem estão descritos detalhadamente no produto educacional, disponível no Apêndice A.1 e, também, no site dedicado à divulgação deste trabalho. O site disponibiliza o presente texto da dissertação, o produto educacional e apresenta uma galeria de fotos e vídeos que descrevem a montagem e utilização do espectrômetro construído. Ele pode ser acessado através do seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

4.1.1. Materiais utilizados e procedimentos

Os materiais para a montagem do espectrômetro foram escolhidos baseados na disponibilidade dos mesmos, sendo que todos podem ser facilmente encontrados em lojas do ramo ou na internet com preços variados. A Tabela 2 traz uma lista dos materiais utilizados para construção do espectrômetro e a Figura 23 apresenta os principais materiais utilizados na construção do mesmo.

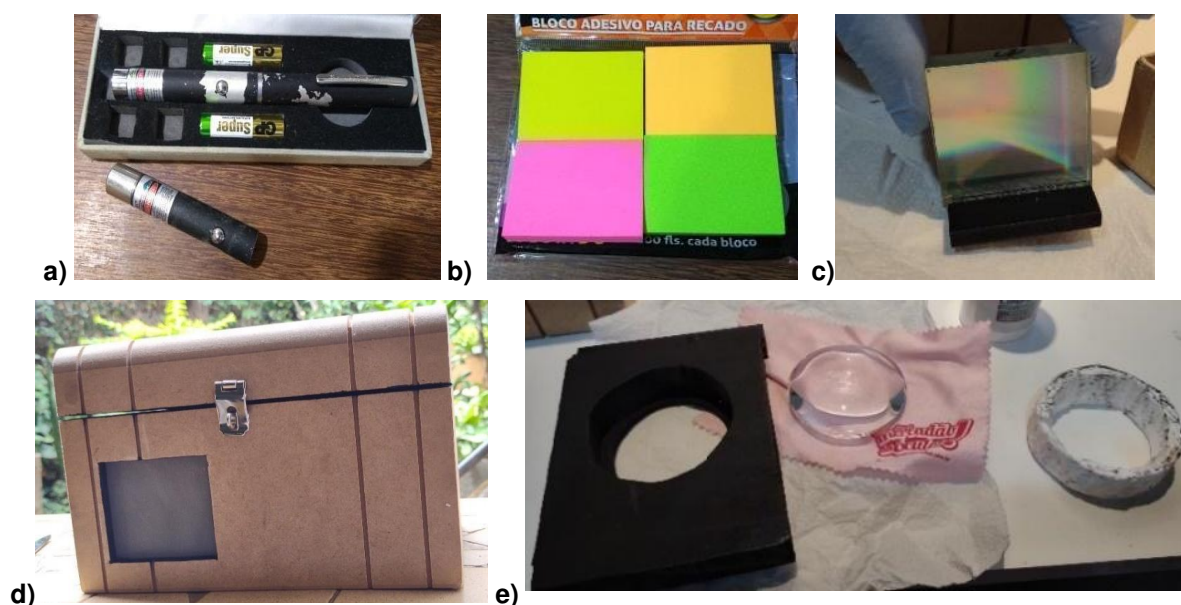
Tabela 2 – Lista dos materiais utilizados para construção do espectrômetro.

	Materiais utilizados
1	Papel de nota em várias cores;
2	Lâmina de acrílico transparente;
3	Pedaço de suporte de canaleta para banners;
4	Caneta <i>laser</i> monocromático verde (532 nm);
5	Caneta <i>laser</i> monocromático violeta (402 nm);
6	Lente convergente de distância focal 6 cm;

7	Lente convergente de distância focal 4 cm;
8	Suporte feito de madeira para as lentes;
9	Isopor para apoio das lentes;
10	Rede de Difração por reflexão (1200 linhas/mm);
11	Caixa baú de madeira em MDF;
12	Papel vegetal.
13	Manta magnética adesiva.

Fonte: Próprio Autor.

Figura 23 – Principais materiais utilizados na construção do espectrômetro. **a)** Caneta laser monocromático verde e violeta utilizado para excitação das amostras; **b)** Papel de nota em várias cores utilizados como amostras para se verificar a fluorescência; **c)** Rede de Difração por reflexão utilizada como o elemento dispersivo do espectrômetro; **d)** Caixa baú de madeira em MDF em que foi montado o aparato experimental; **e)** Lente, suporte feito de madeira e molde de isopor.



Fonte: Próprio Autor.

Para a montagem do espectrômetro, as amostras de papel foram cortadas em pequenos pedaços e fixadas com fita adesiva transparente em uma lâmina de acrílico transparente. A lâmina foi colocada em um suporte, feito com um pedaço de tubo de plástico para banners, posicionado em uma base de madeira como ilustra a Figura 24.

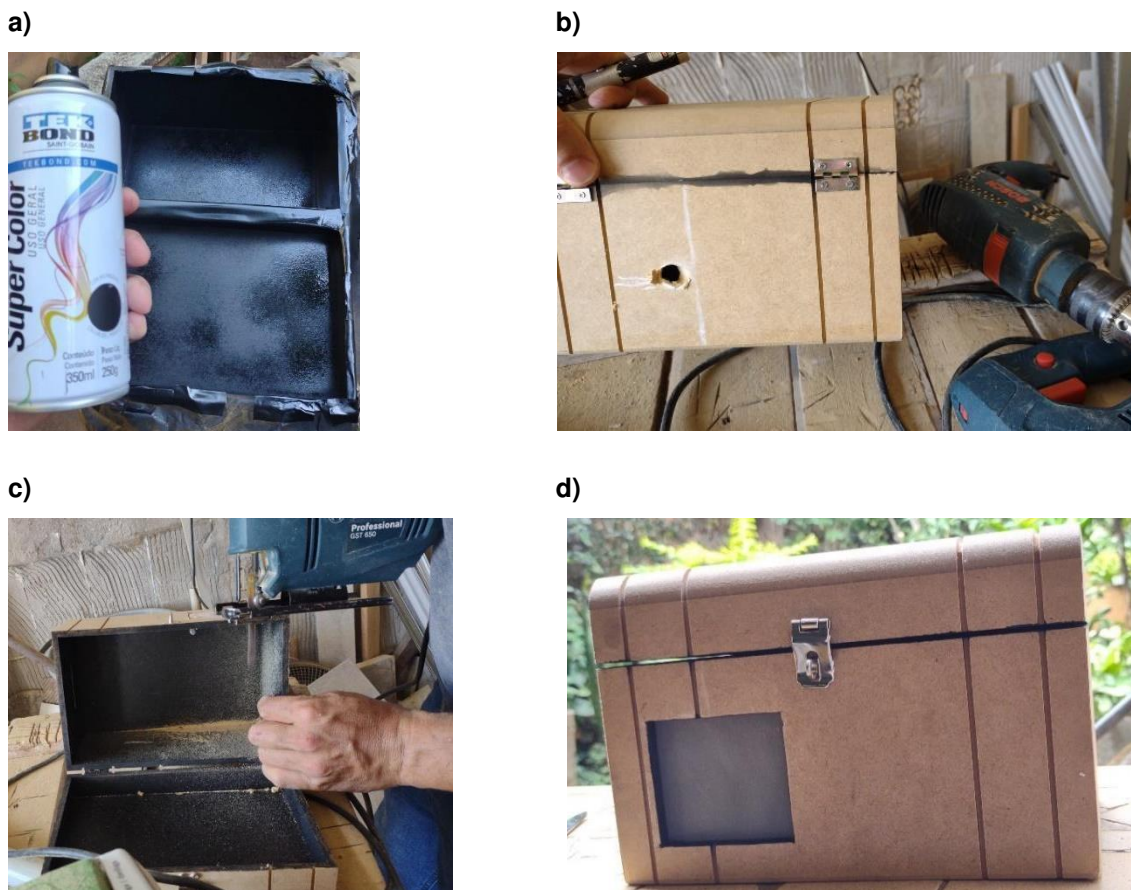
Figura 24 – Amostras de papel de nota de várias cores/corantes fixadas na placa de plástico e posicionada no suporte. Da esquerda para a direita, enumeramos as amostras respectivamente como amostra 1, 2, 3, 4, e 5.



Fonte: Próprio Autor.

A caixa baú de madeira em MDF e os suportes de madeira foram pintados de preto fosco para evitar possíveis reflexões indesejadas e, após fechada, evitar a influência da luz ambiente externa. Como auxílio de uma furadeira, foi feito um furo na lateral da caixa, para que o feixe *laser* pudesse incidir diretamente nas amostras. Adicionalmente, com auxílio de uma serra tico-tico, foi realizado um recorte quadrado onde foi colocado o papel vegetal, que posteriormente tem a função de anteparo para visualização do espectro de fluorescência. Esses passos são ilustrados na sequência da Figura 25.

Figura 25 – Preparação da caixa baú. **a)** Pintura interna da caixa na cor de preto fosco. **b)** Furo feito na lateral da caixa. **c)** Realização do recorte quadrado na lateral oposta ao furo. **d)** Papel vegetal posicionado no recorte feito.

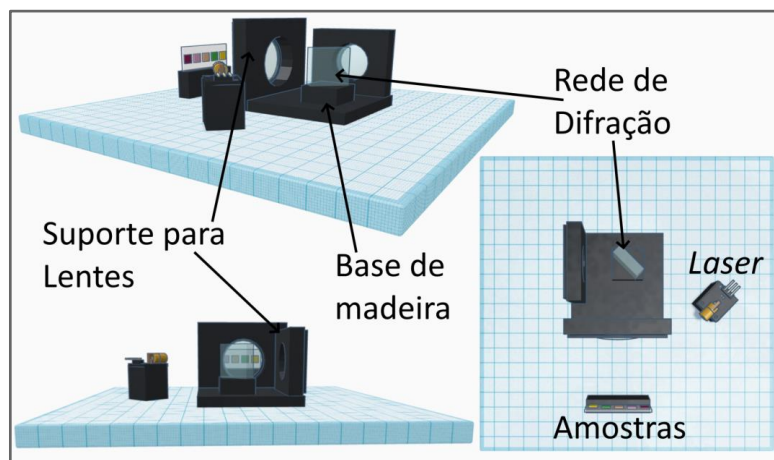


Fonte: Próprio Autor.

O alinhamento desses componentes é de suma importância, ou seja, as amostras e a grade de difração devem estar alinhadas coincidindo com a altura do centro das duas lentes. Além disso, o *laser* deve ser posicionado na altura adequada de modo a incidir diretamente na amostra que se deseja analisar. Essa amostra deve estar exatamente alinhada com o centro da primeira lente, cuja função é colimar os feixes de luz. No modelo 3D da Figura 26 foram destacados os componentes internos do espectrômetro com o intuito de observar suas posições e alinhamentos.

O *laser* monocromático verde e/ou violeta é utilizado para excitar as amostras de papel de nota de várias cores, que corresponde a corantes diferentes impregnando o papel. A região da amostra iluminada pelo *laser* está no foco de uma lente convergente que colima a luz advinda da amostra e a entrega para uma rede de difração.

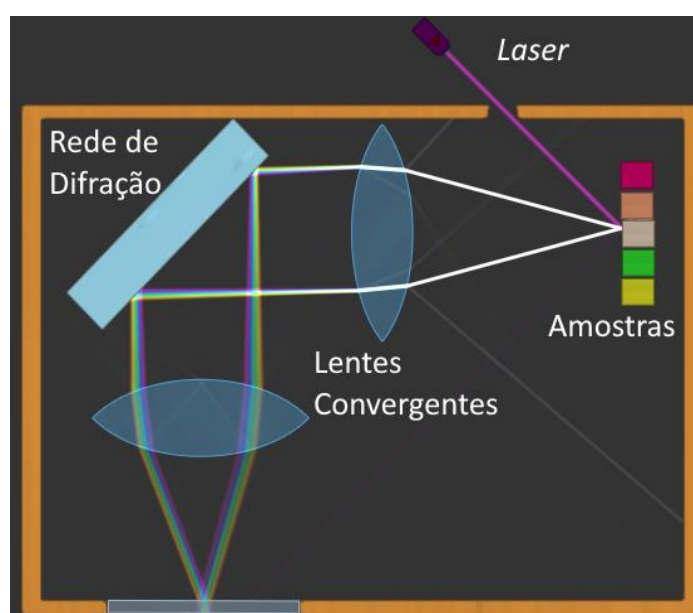
Figura 26 – Esquema em 3D do aparato experimental do espectrômetro construído com destaque para imagens em perspectiva e vista superior dos componentes internos do espectrômetro.



Fonte: *Print screen* editado do modelo 3D construído pelo autor no *Software Tinkercad*, ref. [37].

A rede de difração é o elemento dispersivo do nosso espectrômetro e separa espacialmente os diferentes comprimentos de onda presentes no feixe luminoso advindo da amostra. A segunda lente é utilizada para focalizar as diferentes cores advindas da rede de difração em uma tela de papel vegetal. Essa esquematização é ilustrada na Figura 27.

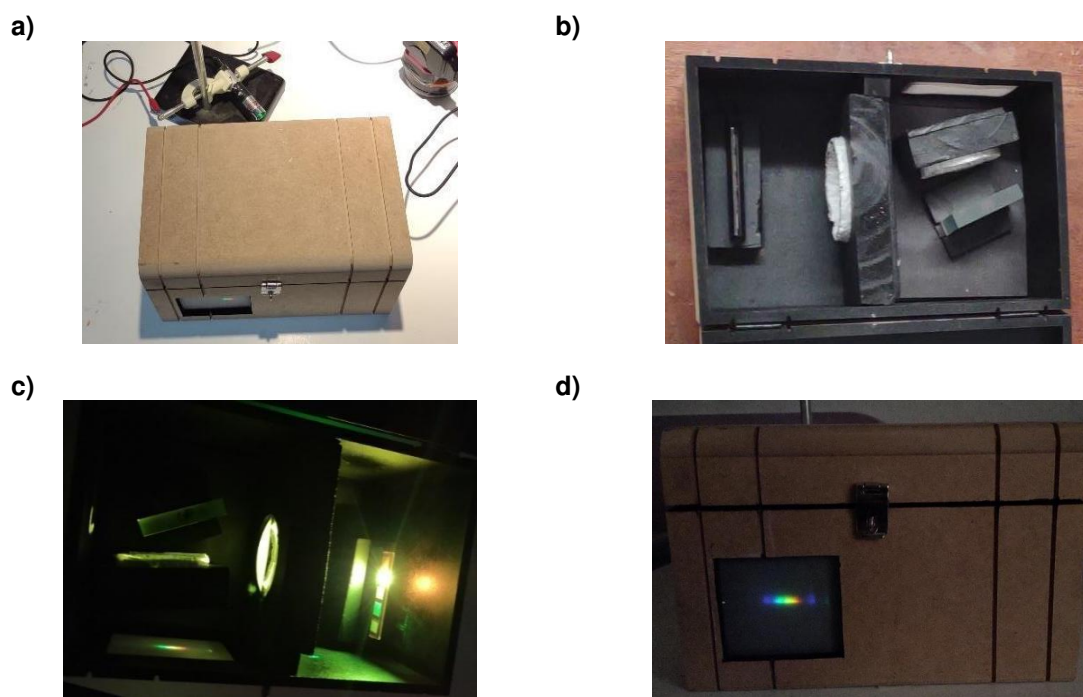
Figura 27 – Esquema de funcionamento do aparato experimental do espectrômetro construído. A região da amostra iluminada pelo *laser* está no foco de uma lente convergente que colima a luz advinda da amostra e a entrega para uma rede de difração. Uma segunda lente é utilizada para focalizar as diferentes cores advindas da rede de difração em uma tela de papel vegetal.



Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*, ref. [29].

A sequência de fotos da Figura 28 ilustra o aparato montado bem como seu funcionamento. Devido ao fenômeno da fluorescência, parte da luz emitida pela amostra apresenta cores distintas da do *laser* utilizado para excitação, como observa-se no anteparo. A energia da emissão é tipicamente menor que a da absorção, sendo assim, a fluorescência normalmente ocorre em energias mais baixas ou comprimentos de onda maiores [22,25].

Figura 28 – Montagem do espectrômetro para verificação da fluorescência. **a)** *Laser* montado externamente ao espectrômetro fechado. **b)** Posicionamento das amostras, lentes e da grade de difração. **c)** Funcionamento do espectrômetro para o *laser* verde. **d)** Parte externa do espectrômetro com destaque para o espectro gerado no anteparo de papel vegetal por uma das amostras excitada com o *laser* violeta.



Fonte: Próprio Autor.

A opção por utilizar a rede de difração por reflexão neste projeto foi motivada pela sua elevada resolução, prezando pela qualidade dos espectros gerados, fundamentais para a comparação com os gráficos do espectrômetro comercial descritos no próximo capítulo. Alternativas que envolvem o uso de redes de difração por transmissão também podem ser utilizadas. O princípio de funcionamento é o mesmo, bastando configurar os componentes do espectrômetro e o anteparo essa finalidade. Detalhes dessa configuração são descritos no produto educacional presente no Apêndice A.1.

4.2. Sequência didática

Como revisão da literatura para auxiliar na construção da sequência didática, pesquisamos artigos e sugestões de sequências didáticas, nas principais revistas de ensino de ciências, que envolvem a aplicação do fenômeno de fluorescência no ensino de física, bem como de alguns temas a ele relacionados. Caso o leitor tenha interesse em aprofundar nesse assunto, recomendo os seguintes artigos: “Uma sugestão para a Interação Multidisciplinar: A Observação do Fenômeno da Fluorescência”, dos autores PIMENTEL, JR., et al., disponível na ref. [38] e “Fluorescência: uma abordagem para o ensino de física moderna e contemporânea no ensino médio”. SILVA, G. A., disponível na ref. [39]. O ensino da luminescência é um componente pouco explorado no currículo de física do ensino médio, talvez devido a esse fato não se tenha muitos trabalhos publicados voltados para essa área.

Cabe ressaltar que uma sequência didática deve ser adaptada à realidade de cada professor e de cada escola. Nossa sequência didática foi pensada para o contexto do segundo ano do ensino médio da rede pública de ensino. Nesta seção vamos explorar a construção e aplicação da sequência didática para utilização do espectrômetro construído para análise da fluorescência. A sequência construída tem como base a teoria de Ausubel que destaca a importância do material ser potencialmente significativo e relacionável com os subsunçores presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Além disso, vamos utilizar as fases do Ciclo de Experiência Kellyana como base para aplicação dos questionários diagnósticos pré-teste e pós-teste, como forma de se verificar a consolidação dos conhecimentos prévios e a evolução da turma após a intervenção. Inicialmente vamos comentar e contextualizar o ambiente escolar para qual foi preparada a sequência didática.

4.2.1 Preparação da sequência didática

O primeiro passo para início da pesquisa foi estabelecer um contato com a direção da escola, na qual o autor é integrante do quadro efetivo de professores regentes de aula. A escola pertence a rede estadual de ensino de Minas Gerais, localizada na cidade de Conselheiro Lafaiete, e conta com uma boa estrutura de trabalho, como por exemplo, salas de aulas com carteiras novas, adequadas aos alunos, lousa branca, *smart TVs* com acesso à internet nas salas de aula e os

professores têm *chromebooks* para auxiliar nas atividades educacionais. Entretanto, apesar das boas condições de trabalho, que são melhores que em muitas outras escolas públicas do estado, se destaca a ausência de laboratórios de ciências, o que acarreta em diversas dificuldades para a realização de práticas experimentais. A falta desse espaço impede que os alunos vivenciem de forma prática os conceitos aprendidos em sala de aula, limitando sua compreensão e experiência na área científica. Uma forma de contornar a falta de laboratório é propor atividades experimentais em sala de aula com caráter demonstrativo ou utilizar de modelos visuais e simulações computacionais disponíveis *on-line*.

Outro ponto que vale destacar são as salas de aula que têm em média 30 a 35 alunos por turma. Essa quantidade elevada de alunos por sala pode intensificar os desafios enfrentados pelos professores, dificultando ainda mais a individualização do ensino e a aplicação de métodos que promovam a aprendizagem significativa, conforme preconizado por Ausubel. Com um grande número de estudantes, o professor pode ter dificuldade em identificar os conhecimentos prévios específicos de cada um, dificultando a criação de conexões significativas entre esses conhecimentos e os novos conteúdos a serem aprendidos.

Além disso, com a reforma atual do novo ensino médio, a quantidade de aulas da componente curricular de Física foi reduzida para uma aula semanal. Essa diminuição no número de aulas dificulta a contemplação do conteúdo básico exigido pelo estado, bem como a implementação de sequências didáticas que envolvam um maior número de aulas. Essa limitação temporal pode comprometer a profundidade com que os conteúdos são abordados e a qualidade das atividades práticas e experimentais propostas.

Diante dos desafios enfrentados na realidade da rede pública de ensino, porém com muita motivação e apoio da direção, foi autorizado a aplicação da sequência didática para duas turmas do segundo ano do ensino médio, sob a supervisão do professor/autor. Foi escolhida a aplicação de questionários diagnósticos pré-teste e pós-teste como forma de verificar a consolidação dos conhecimentos prévios e a evolução da turma após a intervenção. Para isso, o presente trabalho foi submetido e devidamente aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos, CEP,

(número do parecer - 6.444.062). Participaram da sequência didática um total de 65 alunos, que possuem idades entre 16 e 18 anos.

A sequência didática foi pensada e dividida em cinco momentos, conforme apresentado na Tabela 3, compreendendo 5 aulas de 50 minutos. Como base teórica, a sequência foi adaptada de forma a atender o Ciclo de Experiência Kellyana composto de cinco fases: Antecipação; Investimento; Encontro; Confirmação ou Desconfirmação e Revisão Construtiva, que apresenta caminhos de como uma pessoa constroi o conhecimento ^[9].

Tabela 3 – Divisão da sequência didática. A sequência didática foi pensada e dividida em cinco momentos, compreendendo 5 aulas de 50 minutos de forma a atender o Ciclo de Experiência Kellyana.

Primeiro momento	Questionário diagnóstico	Pré-teste: Antecipação	1 aula (50 min)
Segundo momento	Aplicação da Sequência didática	Aula teórica: Investimento	1 aula (50 min)
Terceiro momento		Aula experimental: Encontro	1 aula (50 min)
Quarto momento	Questionário diagnóstico	Pós-teste: Confirmação ou Desconfirmação	1 aula (50 min)
Quinto momento	Resultados e correção dos questionários	Correção: Revisão Construtiva	1 aula (50 min)

Fonte: Próprio Autor.

Em uma proposta de sequência didática baseada no Ciclo de Experiência Kellyana, é comum realizar pré-testes e pós-testes. O pré-teste consiste na aplicação de um questionário antes da sequência didática, enquanto o pós-teste é aplicado após a conclusão da sequência, para avaliar os resultados obtidos ^[7]. Para facilitar a coleta e análise de dados, foi escolhido o uso do formato *on-line* via *Google* Formulários.

Com os formulários pretende-se um projeto de levantamento de dados que tente apresentar uma descrição quantitativa de tendências, atitudes ou opiniões de uma população, através de uma amostragem ^[11]. A partir dos resultados da amostra, pode-se generalizar ou fazer afirmações sobre a população. Em um experimento, por exemplo, a intenção básica é testar o impacto de um tratamento (ou de uma

intervenção) sobre um resultado, controlando fatores que possam influenciar esse resultado ^[11]. Nesse sentido, pela análise dos resultados da amostragem, pode-se inferir, após as análises dos resultados, se a preparação do espectrômetro e sua utilização em sala de aula é uma boa alternativa para estudos de temas relacionados à interação da luz da matéria, bem como relacionar os elementos presentes nos espectrômetros, como estudo das lentes, rede de difração etc., com fenômenos ópticos.

No primeiro momento da sequência didática, referente a fase de Antecipação, foi aplicado o questionário diagnóstico pré-teste. Nesse primeiro momento buscou-se fomentar nos alunos suas primeiras reflexões sobre a intervenção que iriam participar. Adicionalmente, relacionando com a teoria de Ausubel, a construção deste questionário e suas posteriores respostas foram utilizadas para se verificar possíveis conhecimentos prévios, ou seja, possíveis subsunçores relevantes ao conteúdo de espectroscopia, interação da luz da matéria, presentes na abordagem da sequência didática. O segundo momento, referente a fase do Investimento, foi dedicado a aula teórica da sequência didática. Nessa etapa, busca-se que o aluno invista seu esforço em obter mais informações sobre o assunto abordado, contribuindo assim para a construção de seu conhecimento.

No terceiro momento, referente a fase do Encontro, o aluno pode vivenciar diretamente o evento com as demonstrações experimentais e com a visualização do fenômeno da fluorescência presente no espectrômetro construído. Essa fase lhe proporcionou a oportunidade de refletir sobre as ideias previamente construídas nas fases de Antecipação e Investimento. No quarto momento, referente a fase de Confirmação ou Desconfirmação, os alunos foram novamente convidados a responderem um questionário. Com base nas suas novas respostas, os alunos são instigados a reavaliar suas concepções prévias com base no evento vivenciado, submetendo suas hipóteses a teste, podendo estas serem validadas ou contestadas. Os resultados destes questionários, relacionando com a teoria de Ausubel, são de suma importância para nossa análise futura sobre a consolidação dos conhecimentos prévios iniciais e da evolução da turma após a aplicação da sequência didática.

Por fim, o quinto momento, referente a fase de Revisão Construtiva, foi dedicado a uma correção das questões presentes nos questionários, bem como uma

oportunidade de diálogo entre o professor e alunos para rever tudo o que foi vivenciado e reconsiderar as concepções iniciais, contribuindo para a formação de novos conhecimentos. Conforme a visão de Kelly, a aprendizagem ocorre à medida que uma pessoa atravessa essas cinco fases, promovendo uma mudança em sua estrutura cognitiva a partir das experiências anteriores [9].

4.2.2 Aplicação da sequência didática

No primeiro momento, correspondente à primeira aula, os alunos responderam ao questionário diagnóstico pré-teste, para avaliar os conhecimentos prévios (possíveis subsunçores) relacionados ao conteúdo a ser abordado na sequência didática sobre análise de fluorescência, utilizando o espectrômetro construído. Os questionários diagnósticos estão disponíveis no Apêndice A.3 do produto educacional deste presente trabalho. Segundo Ausubel, os subsunçores são variáveis isoladas cruciais para a aprendizagem significativa de novos conhecimentos [7]. O uso do formato *on-line* via *Google* Formulários facilitou a coleta de dados, permitindo análises rápidas e a geração de um arquivo em planilha para análises mais detalhadas. Para as respostas objetivas, foi utilizada a representação na forma de gráficos de setores, feitos na própria plataforma *Google Forms*. Nesse caso as respostas são apresentadas em porcentagem de cada uma das alternativas em relação ao número total de respostas dadas. Com base nos resultados, a sequência didática foi elaborada, seguindo a premissa de Ausubel de que o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo, relacionável à estrutura cognitiva do aluno [1].

O segundo momento, correspondente à segunda aula, foi dedicado a uma aula teórica, abordando o tema da interação da luz com a matéria. Esta aula foi preparada de forma a contemplar os possíveis subsunçores identificados no questionário pré-teste de tal forma que a sequência apresentasse uma progressão lógica de conceitos, facilitando a assimilação e conexão entre os conhecimentos prévios dos alunos e os novos conhecimentos. Portanto, esta etapa visou sistematizar e consolidar as novas informações junto aos subsunçores preexistentes, tornando os conhecimentos mais estáveis na estrutura cognitiva do aluno, conforme a dinâmica da aprendizagem significativa proposta por Ausubel [1]. Os detalhes dessa aula e os slides estão disponíveis no Apêndice A.2.1 deste presente trabalho. Ao final da aula, os alunos foram convidados a refletirem sobre o que estaria por vir na aula experimental. O

último *slide* contou com uma pergunta instigadora: “Por que, ao direcionar um laser verde para diferentes cores de papel, a luz percebida parece variar?”, seguido de uma sequência de imagens como ilustrado na Figura 29 destacando esse fenômeno. A intenção foi fazer com que os alunos criassem hipóteses para que as mesmas fossem discutidas na seguinte aula experimental.

Figura 29 – Efeito visual ao direcionar um *laser* verde para diferentes cores de papéis de nota. Essa sequência de imagens foi colocada em um *slide* com uma pergunta instigadora: “Por que, ao direcionar um laser verde para diferentes cores de papel, a luz percebida parece variar?”



Fonte: Próprio Autor.

Na terceira aula, a ênfase foi na parte experimental, incluindo experimentos sobre luminescência e a apresentação do espectrômetro construído. A parte experimental, conforme destacado por Ausubel, demanda atividade cognitiva para relacionar os novos conhecimentos com os já existentes, envolvendo processos de captação de significados e ancoragem [1]. Como discutido anteriormente, devido à falta de um laboratório apropriado para práticas experimentais, optou-se por uma aula demonstrativa e foi usado a sala de vídeo para a realização das atividades. Com o intuito de proporcionar uma melhor visualização da luminescência durante os experimentos, foi necessário escurecer a sala de vídeo, fechando as cortinas das janelas e utilizando papel pardo nos basculantes, como apresentado na Figura 30. Além disso, durante as demonstrações, as luzes e a televisão foram desligadas

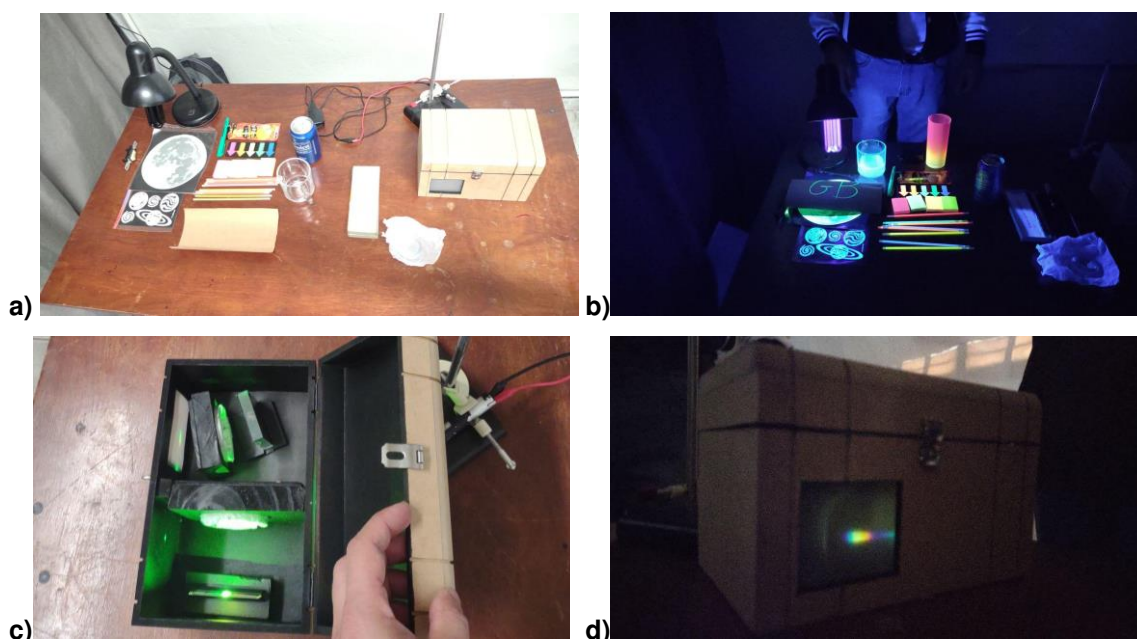
Figura 30 – a) Devido a claridade da sala de vídeo; b) Foi necessário escurecer a sala fechando as cortinas das janelas e colocando papel pardo nos basculantes.



Fonte: Próprio Autor.

O propósito da aula experimental foi introduzir o conceito de luminescência e elucidar o princípio de funcionamento de um espectrômetro. Preparou-se uma apresentação de slides para orientar os alunos sobre os novos temas abordados, detalhando a construção do espectrômetro, suas partes e os procedimentos experimentais. Sobre uma mesa, foi montada uma luminária com uma lâmpada fluorescente que emite luz na faixa do ultravioleta (UV) (luz negra) e vários objetos. A luz foi utilizada como fonte para excitar esses diferentes objetos luminescentes, objetivando exemplificar a diferença entre fosforescência e fluorescência, conforme explicado no capítulo 3, seção 3.2.1, e na sequência de fotos da Figura 31.

Figura 31 – **a)** Montagem da mesa com a luminária de luz negra e objetos luminescentes (papéis de nota e marca páginas tipo *Post it* de várias cores; copo com água tônica; adesivos e marca texto fosforescentes; pulseiras neon (*glow sticks*) e copo fosforescente). **b)** Destaque para demonstração da luminescência. **c)** Espectrômetro construído destacando seus componentes. **d)** Demonstração do funcionamento do espectrômetro com o espectro de fluorescência gerado no anteparo.



Fonte: Próprio Autor.

Adicionalmente, o espectrômetro construído foi posicionado na mesma mesa, de modo que, no momento apropriado da sequência didática, fosse utilizado para demonstrar a fluorescência das amostras de papel *post-it* de várias cores/corantes, permitindo a observação do espectro de emissão no anteparo de papel vegetal, assim como a função das suas principais partes constituintes. As imagens da Figura 31 ilustram as demonstrações realizadas na aula experimental.

A demonstração da luminescência utilizando luz negra e o experimento de quimioluminescência com o óculos feito com a pulseira neon (*glow stick*) despertaram grande interesse nos alunos, e alguns deles compartilharam experiências anteriores com esse fenômeno em festas iluminadas por esse tipo de luz. Sob luz negra, a fluorescência, principalmente de roupas e objetos brancos, foi observada pelos estudantes, notando a fluorescência na roupa branca do professor e em seus próprios uniformes.

Em seguida, realizou-se o experimento com a fluorescência da água tônica, e os alunos questionaram se a água mineral também apresentaria fluorescência. Para responder a essa pergunta, os próprios estudantes expuseram uma garrafa de água mineral à luz negra, não observando nenhum efeito, ao contrário da água tônica. Além disso, a fosforescência do adesivo em formato de lua e dos marca-textos foi relacionada ao cotidiano por alguns alunos que já haviam notado esse efeito em adesivos geralmente colocados em quartos de crianças. Essas vivências vão de acordo com a teoria do Ciclo de Experiência Kellyana, de modo que os alunos, ao vivenciar diretamente o evento com as demonstrações experimentais, tiveram a oportunidade de refletir sobre as ideias previamente construídas nas primeiras aulas da sequência. Cabe destacar que o professor a todo momento procurou fomentar perguntas motivadoras e promover a discussão entre os estudantes sobre suas observações e hipóteses em cada demonstração. A discussão sobre a pergunta instigadora da aula anterior também foi demonstrada e os alunos puderam rever suas hipóteses e discutir entre eles e com o professor sobre os resultados observados. Alguns trechos da aula estão presentes em curtos vídeos disponibilizados na galeria do site no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

Após introduzir os alunos ao conceito de fluorescência, foi realizada uma discussão sobre a montagem do espectrômetro construído, utilizando apresentação dos *slides* da sequência didática. Em seguida os alunos foram convidados a observarem a montagem no próprio espectrômetro, durante essa discussão, foram abordadas as funcionalidades de cada componente do aparato.

Com o aparato experimental devidamente montado e as luzes apagadas, inicialmente utilizou-se o *laser* de comprimento de onda 532 nm (verde) como fonte de excitação. Ressalto que o professor deve ter cuidado ao conduzir experimentos que utilizam *laser*, prezando pela segurança dos alunos. Os alunos foram solicitados a observar as cores no anteparo do espectrômetro para as cinco amostras. O mesmo procedimento foi repetido com o *laser* de comprimento de onda 405 nm (violeta) como fonte de excitação. Nesse momento os alunos foram questionados sobre a observação de cores diferentes da caneta *laser*. Esse ponto foi muito rico, pois através das respostas dos alunos, pode ser feita uma relação entre o “aparecimento” dessas cores no anteparo com o fenômeno da fluorescência discutido até então. Se percebeu uma surpresa por parte dos alunos principalmente ao se depararem com o espectro de emissão do laser violeta, onde se destaca todo espectro visível no anteparo, do violeta ao vermelho.

Após as observações visuais das cores, os alunos foram instruídos a comparar os resultados observados com os espectros/gráficos obtidos no espectrômetro comercial, conforme ilustrado nas Figuras 36 e 41 da próxima seção. Foi questionado aos alunos se os gráficos apresentados coincidiram com o observado visualmente no espectrômetro construído. Isso vai de encontro com a pergunta instigadora inicial, pois agora, após a contemplação do espectro visual no anteparo do espectrômetro, se pode afirmar que quando um laser verde incide em um papel fluorescente, parte da luz verde é absorvida pelo papel e parte é convertida em luz de comprimentos de onda maiores, emitida pelo papel, ou seja, esse é o fenômeno da fluorescência.

No quarto momento, quarta aula, os alunos responderam ao questionário diagnóstico pós-teste. Nesse último momento, pretendeu-se verificar os novos conhecimentos construídos, evidenciando as mudanças estabelecidas em relação aos conhecimentos prévios verificados no primeiro momento. É relevante salientar que os questionários pré-teste e pós-teste são idênticos, permitindo a observação da evolução da turma, embora os alunos não sejam informados sobre esse detalhe. Este questionário foi aplicado uma semana após a aula experimental, a fim de avaliar se a aprendizagem foi possivelmente significativa, isto é, não meramente mecânica.

Segundo a teoria de Ausubel, é importante observar o tempo de obliteração. Na medida em que um subsunçor não é frequentemente utilizado, ocorre essa inevitável obliteração, essa perda de discriminação entre significados, um processo normal do funcionamento cognitivo, caracterizado pelo esquecimento [7]. Contudo, em se tratando de aprendizagem significativa, a aprendizagem é possível e relativamente rápida. Essa condição difere significativamente da aprendizagem mecânica. Se o esquecimento for total, assemelhando-se ao caso em que o indivíduo nunca tivesse aprendido um certo conteúdo, sendo provável que a aprendizagem tenha sido mecânica, não significativa [7]. Devido ao contexto discutido inicialmente, a implementação de sequências didáticas que envolvam um maior número de aulas é de difícil aplicação à realidade do ensino médio de escolas públicas. Dessa forma, não se pôde verificar de forma correta esse tempo de obliteração. Na seção 5.2 será explorado os resultados dos questionários diagnósticos aplicados.

Por fim, o quinto momento, foi dedicado a uma correção das questões presentes nos questionários, bem como uma oportunidade de diálogo entre o professor e alunos para rever tudo o que foi vivenciado e reconsiderar as concepções iniciais, contribuindo para a formação de novos conhecimentos. Vale destacar alguns relatos dos alunos. Após a vivência da sequência didática, alguns alunos que fizeram, o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM 2023) em caráter de treinamento, comentaram que a intervenção foi de suma importância em algumas questões que foram cobradas no exame. Em especial a questão presente na Figura 32 que destaca o funcionamento de dispositivos ópticos como o CD, DVD e o *laser*.

Figura 32 – Questão 112 do ENEM 2023, segundo dia, caderno azul. INEP. Gabarito da questão: alternativa A.

QUESTÃO 112

Informações digitais — dados — são gravadas em discos ópticos, como CD e DVD, na forma de cavidades microscópicas. A gravação e a leitura óptica dessas informações são realizadas por um laser (fonte de luz monocromática). Quanto menores as dimensões dessas cavidades, mais dados são armazenados na mesma área do disco. O fator limitante para a leitura de dados é o espalhamento da luz pelo efeito de difração, fenômeno que ocorre quando a luz atravessa um obstáculo com dimensões da ordem de seu comprimento de onda. Essa limitação motivou o desenvolvimento de lasers com emissão em menores comprimentos de onda, possibilitando armazenar e ler dados em cavidades cada vez menores. Em qual região espectral se situa o comprimento de onda do laser que otimiza o armazenamento e a leitura de dados em discos de uma mesma área?

- A Violeta.
- B Azul.
- C Verde.
- D Vermelho.
- E Infravermelho.

Na aula teórica presente na sequência didática e nas observações da aula experimental foram expostos esses instrumentos ópticos, bem como a relação do comprimento de onda com as cores, fundamental para resolução dessa questão em específico. Esses relatos são bastante satisfatórios, indicando que a sequência didática forneceu bases para que os alunos pudessem interpretar corretamente questões cujos temas foram abordados durante a intervenção.

5. RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do espectrômetro construído, comparando as observações visuais com os dados gerados por um espectrômetro comercial. Além disso, são analisados os resultados da sequência didática embasada no Ciclo de Experiência Kellyana, incluindo os dados dos questionários diagnósticos pré-testes e pós-testes. O capítulo também aborda as percepções dos autores sobre os experimentos e os resultados obtidos, baseadas na interação entre professor e alunos durante as aulas teóricas e práticas da sequência didática.

5.1. Resultados experimentais do espectrômetro

No espectrômetro construído e utilizado na sequência didática, as fontes de excitação foram *lasers* de comprimentos de onda 532 nm (verde) e 405 nm (violeta). Durante a execução do experimento, como já mencionado na metodologia, foram observadas as fluorescências das diferentes amostras/corantes, revelando que os surgimentos de novos comprimentos de onda são distintos para amostras diferentes. Além das análises via observação das cores no anteparo do espectrômetro construído, as cinco amostras também foram analisadas quanto a sua fluorescência em um espectrômetro comercial do laboratório de caracterização óptica do Departamento de Física – DPF, da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Figura 33.

Figura 33 – a) Espectrômetro comercial (*FluoroMax, Horiba*) do laboratório de caracterização óptica do DPF da Universidade Federal de Viçosa – UFV, utilizado para fazer as análises de fluorescência das cinco amostras estudadas. b) Detalhe para seus componentes ópticos internos.



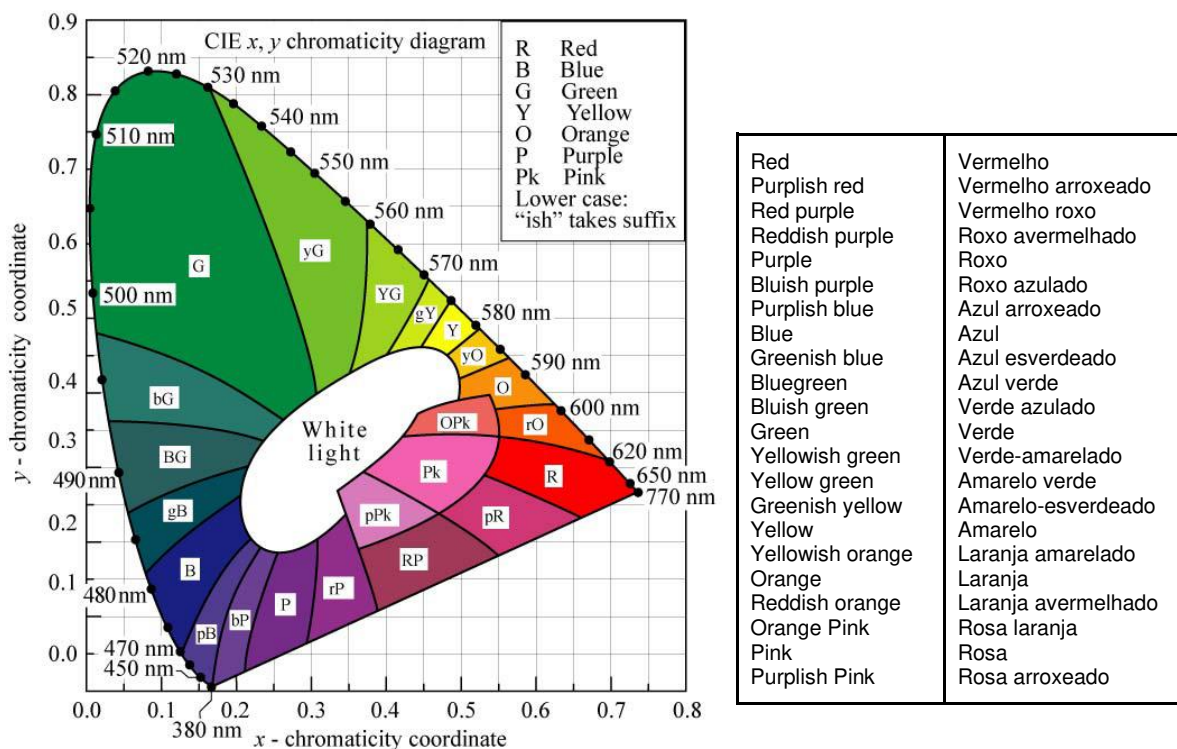
Fonte: foto do espectrômetro comercial tirada pelo próprio Autor.

A excitação foi feita utilizando uma lâmpada e os comprimentos de onda selecionados foram o 514 nm (verde) e 425 nm (violeta). Com as amostras

devidamente posicionadas no equipamento, foram obtidos os espectros de fluorescência das mesmas, gerando gráficos de intensidade *versus* comprimento de onda para cada uma das diferentes amostras.

A aparência da cor da luz de um determinado comprimento de onda depende das condições de visualização e também pode ser ligeiramente diferente de um observador para outro [41]. Além disso, o fato de existirem três tipos diferentes de células (cones) que funcionam como fotorreceptores de intensidade de luz, faz com que a visão humana associe uma sensação diferente de cor à medida que se muda o comprimento de onda emitido por uma determinada fonte [41]. Devido a isso, foram gerados diagramas de cromaticidade, como os da figura 14, com os dados obtidos via espectrômetro comercial.

Figura 34 – Diagrama de cromaticidade CIE-1931 e regiões aproximadas de cores. Ao lado a tradução para a legenda de cores do diagrama. Nos diagramas de cromaticidade, a intensidade em função do comprimento de onda da luz dos espectros de emissão ou de absorção, são convertidos em uma única coordenada cromática (x,y), associada à percepção do olho humano.



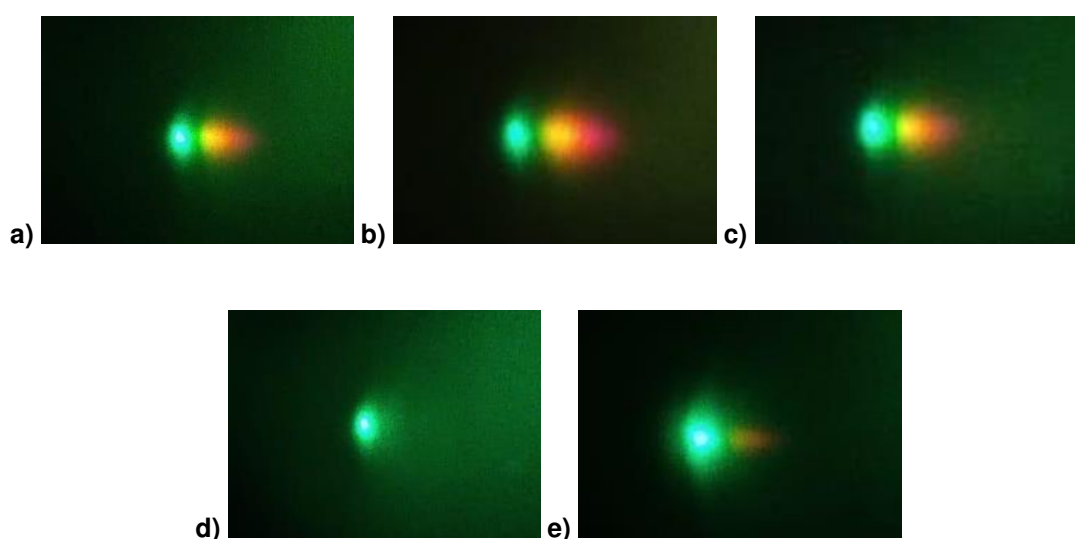
Fonte: Extraído e traduzido da referência [41].

Nos diagramas de cromaticidade, a intensidade em função do comprimento de onda da luz dos espectros de emissão ou de absorção, são convertidos em uma única coordenada cromática (x,y), associada à percepção do olho humano [41]. Esse diagrama fornece uma espécie de mapa de cores no qual as cromaticidades de todas as cores podem ser plotadas de acordo com a Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Éclairage*). O diagrama de cromaticidade mais comumente usado é o CIE-1931, como ilustrado na Figura 34 [41].

5.1.1. Experimentos com excitação no verde

A Figura 35 ilustra os resultados obtidos via observação das cores no anteparo do espectrômetro construído utilizando o *laser verde* (532 nm). Visualmente, se observa uma maior intensidade de fluorescência para as amostras 2 e 3. A amostra 2 apresenta uma maior intensidade na faixa do amarelo, laranja e vermelho, já a amostra 3 na faixa do amarelo e laranja. Para a amostra 1, observa-se uma intensidade intermediária de fluorescências na faixa do amarelo, laranja e vermelho.

Figura 35 – Resultados obtidos via observação das cores no anteparo do espectrômetro construído para cada uma das cinco amostras, em que a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3; d) Amostra 4; e) Amostra 5. Utilizando o laser verde como fonte de excitação, observa-se, para cada amostra, um padrão distinto de cores e intensidades no anteparo devido à fluorescência.



Fonte: Próprio Autor.

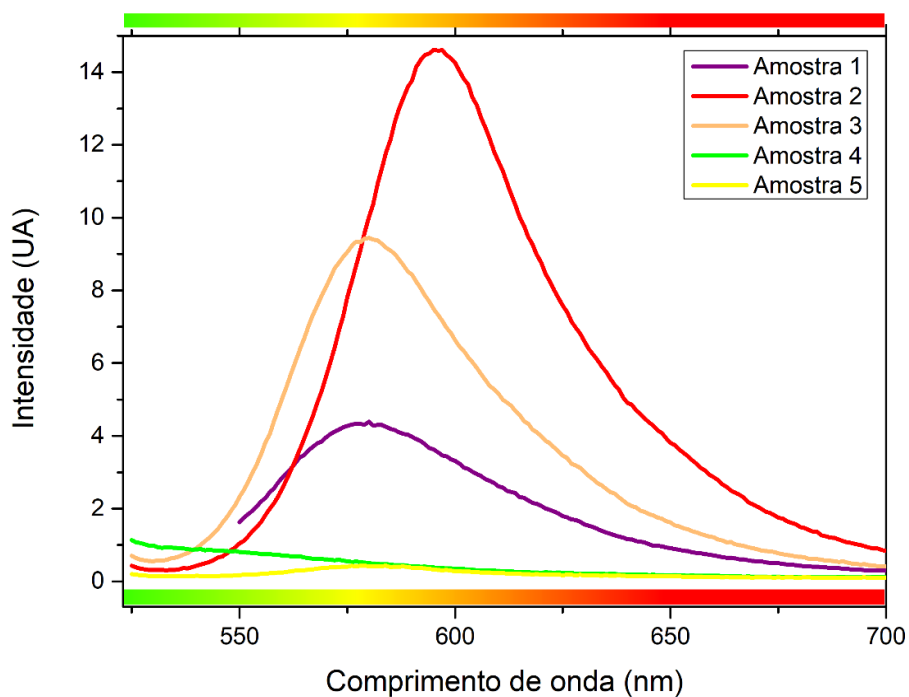
Para a amostra 5 é possível observar apenas uma pequena intensidade de fluorescência na faixa do amarelo, laranja e vermelho. Já para a amostra 4 não se observou visualmente a fluorescência para o tipo de excitação usada. Em todas as amostras temos uma faixa verde extremamente intensa no anteparo devido à reflexão do próprio *laser* verde. Vale ressaltar que a amostra 4 não apresentou fluorescência, mas com um feixe *laser* mais energético, ou seja, para um comprimento de onda menor, a amostra poderá fluorescer, como veremos para os testes realizados com o *laser* violeta (405 nm).

Para comparação e validação do espectrômetro construído foi feita a análise da fluorescência no espectrômetro comercial, cujos resultados estão presentes nos gráficos da Figura 36. Mantendo-se as mesmas condições experimentais para a coleta de dados, nota-se uma maior intensidade de fluorescência para as amostras 2 e 3. O máximo da banda de fluorescência para a amostra 2 foi em torno de 590 nm, o que corresponde a uma cor laranja, enquanto o máximo de fluorescência da amostra 3 foi em torno de 575 nm, correspondendo a uma cor amarelo-esverdeado.

Na amostra 1, observa-se uma intensidade intermediária de fluorescência também em torno de 575 nm. A amostra 5 apresentou uma baixa intensidade de fluorescência com uma banda alargada centrada em torno de 580 nm, cor amarela. A amostra 4 não apresentou sinal de fluorescência para o tipo de excitação e parâmetros utilizados na coleta de dados. O espectro de emissão observado na faixa do verde, mesmo bem fraco, se refere à emissão da própria fonte de excitação, que praticamente não foi absorvida pela amostra, sendo coletada no detector.

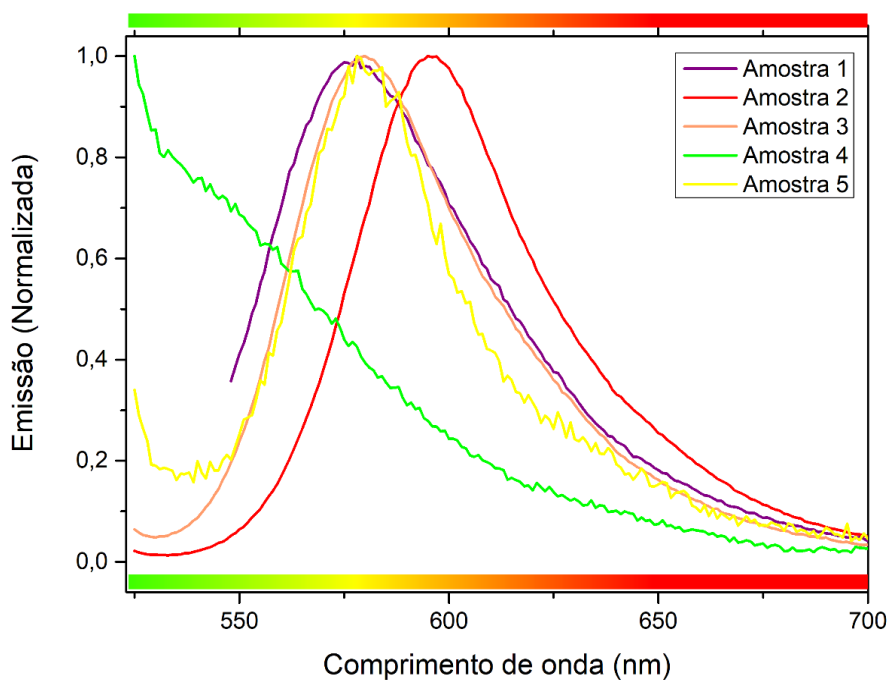
O gráfico normalizado da emissão para a excitação no verde (514 nm), Figura 37, evidencia que as amostras 1, 3 e 5 apresentam uma banda semelhante de fluorescência, mas com intensidades diferentes como discutido anteriormente. Já a amostra 2 possui maior fluorescência na região do laranja. A amostra 4 não apresentou sinal de fluorescência para o tipo de excitação usada, indicando apenas a emissão da própria fonte de excitação que apesar de estar centrada em 514, possui uma largura espectral que é medida, pois não foi utilizado nenhum filtro de cor específico para barrar a emissão da fonte.

Figura 36 – Gráfico da intensidade da fluorescência *versus* comprimento de onda das cinco amostras estudadas utilizando a fonte de excitação em 514 nm (verde).



Fonte: Próprio Autor.

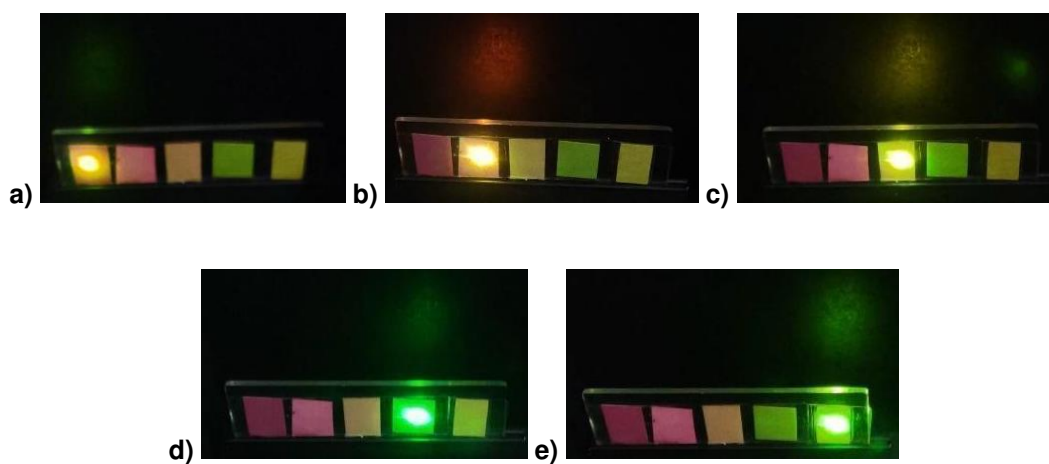
Figura 37 – Gráfico normalizado da fluorescência *versus* comprimento de onda das cinco amostras estudadas utilizando a fonte de excitação em 514 nm, evidenciando que as amostras 1, 3 e 5 apresentam uma banda semelhante de fluorescência.



Fonte: Próprio Autor.

Outra análise pertinente é realizada pelo diagrama de cromaticidade. Na Figura 38 é apresentada uma análise visual das cinco amostras após excitação com laser verde. Utilizando os dados obtidos pela fluorescência via espectrômetro comercial, foi gerado um mapa de cores para as cinco amostras utilizando o laser verde (514 nm) como fonte de excitação.

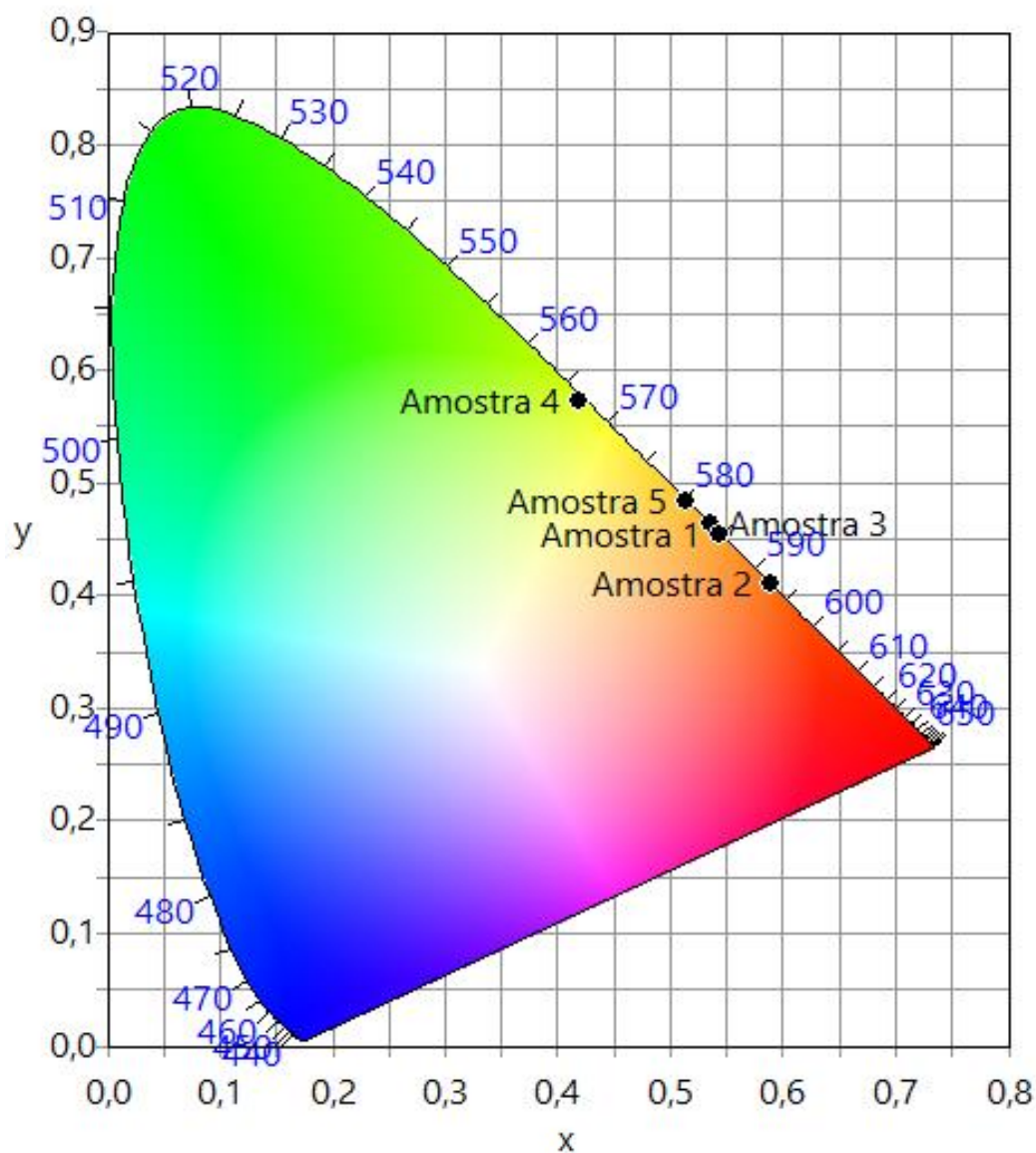
Figura 38 – Análise visual das cinco amostras excitadas com o laser verde, em que: **a)** Amostra 1; **b)** Amostra 2; **c)** Amostra 3; **d)** Amostra 4; **e)** Amostra 5.



Fonte: Próprio Autor.

Com esses dados foi gerado o diagrama de cromaticidade para essas amostras apresentado na Figura 39. Para o *laser* verde, as amostras apresentam, tanto no diagrama de cromaticidade, quanto na análise visual, cores semelhantes, sendo: laranja amarelado para amostra 1 e 3; laranja para amostra 2, amarelo para a amostra 5, que reflete uma quantidade grande do *laser*, e amarelo verde para a amostra 4, que também reflete muito o *laser* verde. Como as amostras 4 e 5 tiveram pouca fluorescência, devido à intensidade do *laser* e sua reflexão, é esperado que a cromaticidade/visual tendam para o verde da fonte de excitação. Vale destacar que essas cores são o resultado da composição dos vários comprimentos de onda de fluorescência. Apenas após a passagem pelas lentes, e a devida dispersão pela grade de difração, é que se pode perceber o espectro de cores separadamente, destacados no espectro de fluorescência da análise anterior.

Figura 39 – Diagrama de cromaticidade para as amostras excitadas com *laser* verde *versus* comparação visual das amostras cinco amostras.



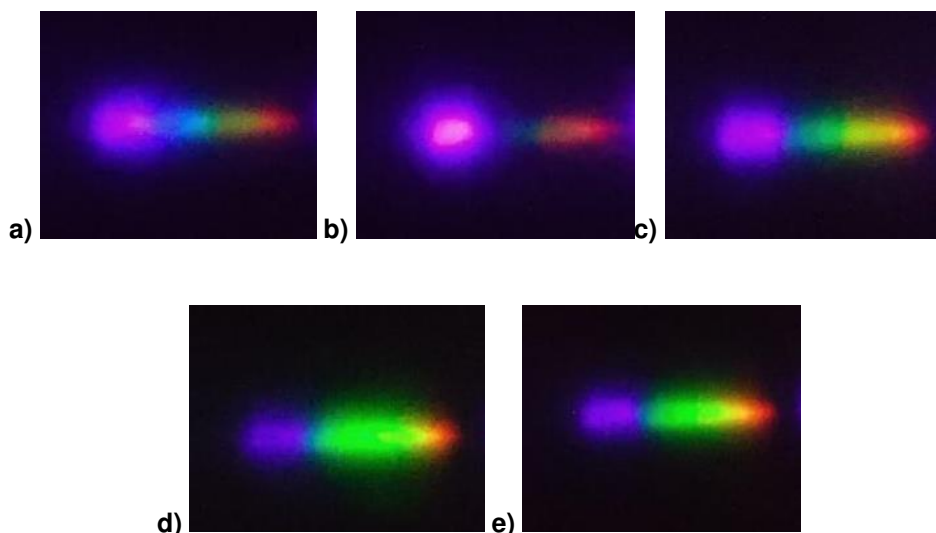
Fonte: Próprio Autor.

5.1.2. Experimentos com excitação no violeta

Uma segunda análise visual foi realizada utilizando um *laser* violeta de comprimento de onda de 405 nm, Figura 40. A amostra 1 apresentou fluorescência mais intensa na cor azul, e menos intensa na faixa do verde, amarelo, laranja e vermelho. Para a amostra 2 foi observada fluorescência de menor intensidade na faixa do azul e verde, e um pouco mais intensa na faixa do amarelo, vermelho e laranja. Na amostra 3 observa-se fluorescência na faixa do azul ao vermelho. As amostras 4 e 5

também apresentam uma fluorescência na faixa do azul ao vermelho, sendo mais intensa na faixa do verde.

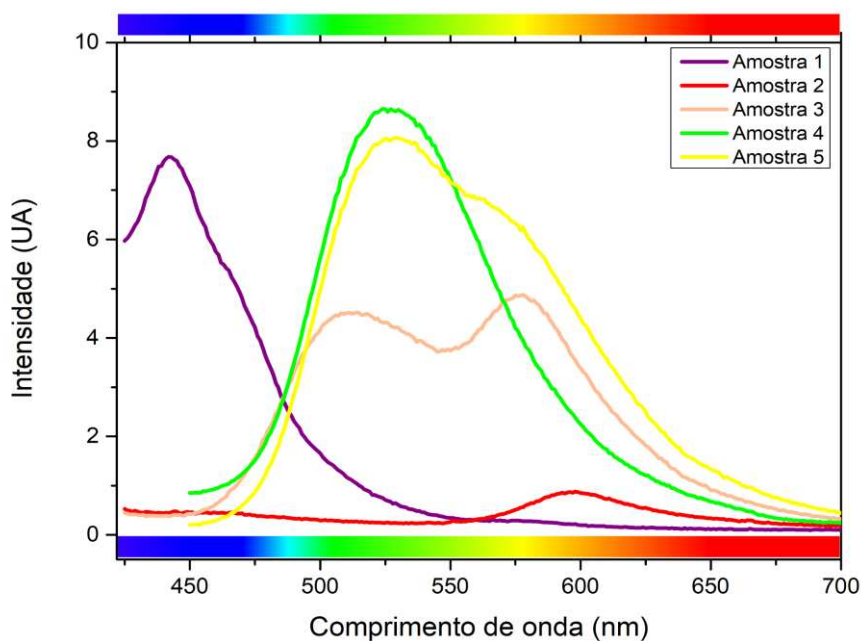
Figura 40 – Resultados obtidos via observação das cores no anteparo do espectrômetro construído para cada uma das cinco amostras, em que: **a)** Amostra 1; **b)** Amostra 2; **c)** Amostra 3; **d)** Amostra 4; **e)** Amostra 5. Utilizando o laser violeta como fonte de excitação, observa-se um padrão distinto de cores e intensidades no anteparo devido à fluorescência.



Fonte: Próprio Autor.

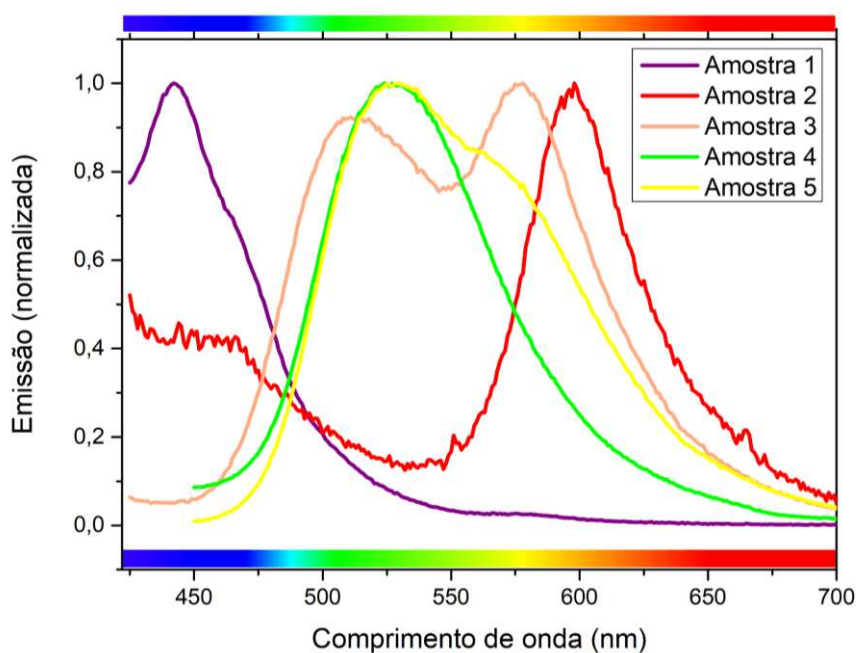
Para comparação e validação do espectrômetro construído foi feita a análise da fluorescência no espectrômetro comercial utilizando uma fonte de excitação de comprimento de onda de 425 nm (violeta). Os resultados obtidos estão presentes nos gráficos da Figura 41. Nota-se no gráfico uma maior fluorescência para as amostras 4 e 5, com um máximo de emissão em torno de 525 nm, correspondendo a uma cor verde, como também observado no espectrômetro construído. Para a amostra 3 observa-se uma fluorescência mais intensa por volta de 580 nm, cor amarela, e 500 nm, cor verde, sendo menos intenso para as demais cores. A amostra 1 apresenta um máximo de fluorescência por volta de 440 nm, em uma cor azul arroxeadada. A amostra 2 apresenta um pico alargado em torno de 575 a 625 nm, desde o amarelo ao laranja, não muito intenso. Adicionalmente, o gráfico normalizado da emissão para a excitação no violeta (425 nm), Figura 42, evidencia as faixas de emissão das cinco amostras. Nota-se que as amostras 2, 3 e 5 contemplam uma maior faixa de fluorescência no espectro.

Figura 41 – Gráfico da intensidade da fluorescência *versus* comprimento de onda das cinco amostras estudadas utilizando comprimento de onda de 425 nm (violeta) como fonte de excitação.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 42 – Gráfico normalizado da fluorescência *versus* comprimento de onda das cinco amostras estudadas utilizando o *laser* violeta de comprimento de onda 425 nm evidenciando as faixas de emissão das cinco amostras. Nota-se que as amostras 2, 3 e 5 contemplam uma maior faixa de fluorescência no espectro.



Fonte: Próprio Autor.

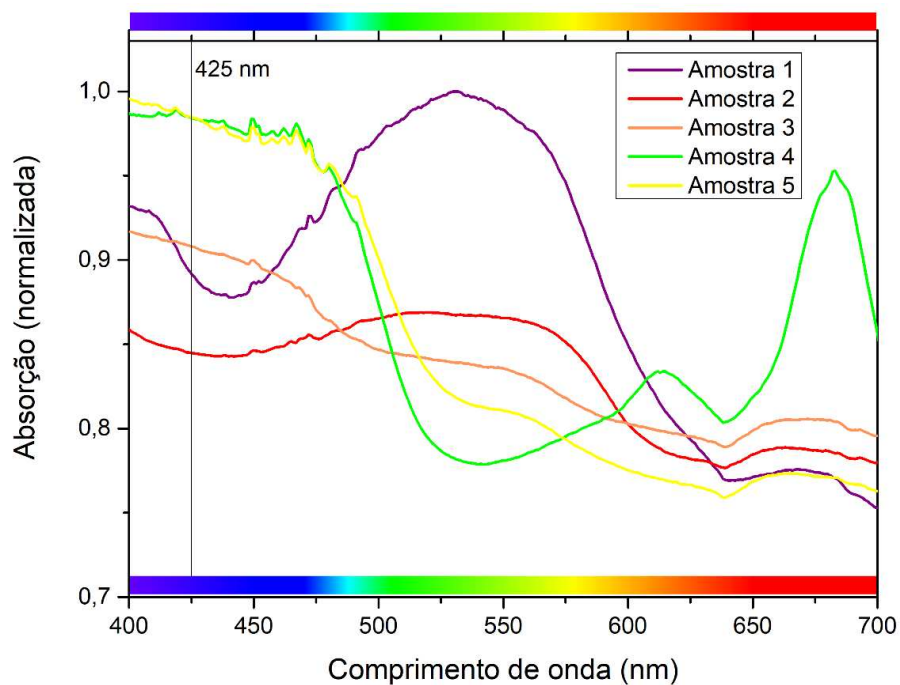
Para os espectros observados visualmente, em todas as amostras foi possível observar um brilho intenso na região do violeta devido à reflexão do próprio *laser*. Note que esse pico é mais intenso para a amostra 2, evidenciando uma menor absorção para essa região do espectro e, por esse motivo, a fluorescência para essa amostra é menos intensa. O mesmo vale para as amostras 1 e 3, com um pouco menos de intensidade para o pico do violeta comparadas com a 2 e, conseqüentemente, apresentam uma fluorescência intermediária. Para as demais amostras (4 e 5) se observa um brilho menos intenso do *laser* violeta, e uma maior fluorescência. Esse fato deve indicar que essas amostras absorvem melhor a região do violeta.

Para testar essa hipótese foi realizada uma análise de absorção no espectrômetro comercial. Um gráfico de espectro de absorção é uma representação visual que mostra como a absorção de luz por uma substância varia com o comprimento de onda. No eixo horizontal do gráfico, temos os comprimentos de onda da luz (em nanômetros, nm), enquanto no eixo vertical está a quantidade de luz absorvida. Menor absorção significa que mais luz é refletida, resultando em menor intensidade de fluorescência. Por outro lado, maior absorção implica que mais luz é capturada pela amostra, resultando em uma maior intensidade de fluorescência. A análise de absorção com um espectrômetro ajuda a confirmar quantitativamente essas observações.

No gráfico normalizado de absorção *versus* comprimento de onda, ilustrado na Figura 43, se percebe uma maior absorção para as amostras 4 e 5 na região do violeta (425). As demais amostras absorvem menos nessa região, o que está de acordo com a análise visual observada no espectrômetro construído (Figura 40).

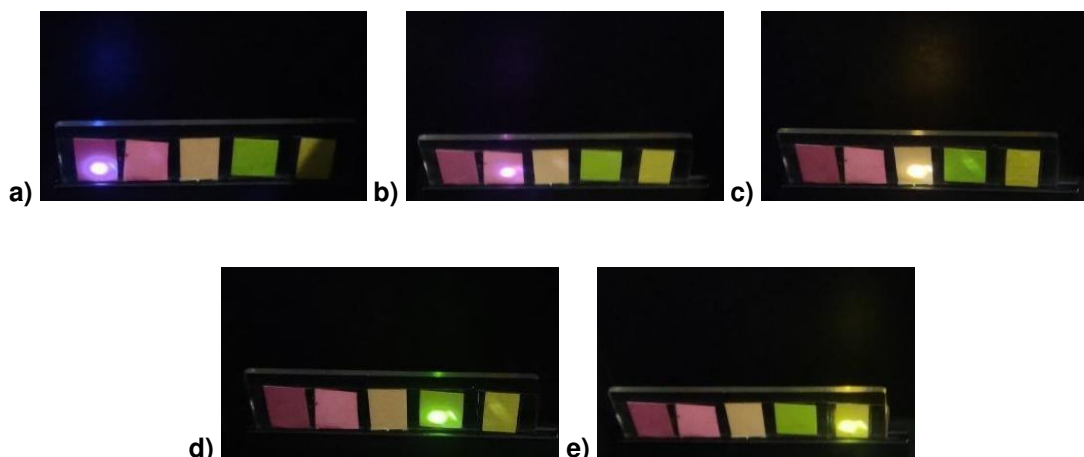
Essa análise não pôde ser verificada para as observações envolvendo o *laser* verde, pois sua potência era muito superior ao do *laser* violeta, e não foi possível notar uma diferença em relação à intensidade do brilho do feixe refletido nos espectros visuais (Figura 35). Entretanto, é possível observar que as amostras 4 e 5 absorvem menos o verde, como discutido no espectro de absorção da seção 5.1.1.

Figura 43 – Gráfico normalizado de absorção *versus* comprimento de onda das cinco amostras estudadas. Detalhe para absorção na região do *laser* violeta (425 nm). Ao lado a análise visual via espectrômetro construído das respectivas cinco amostras.



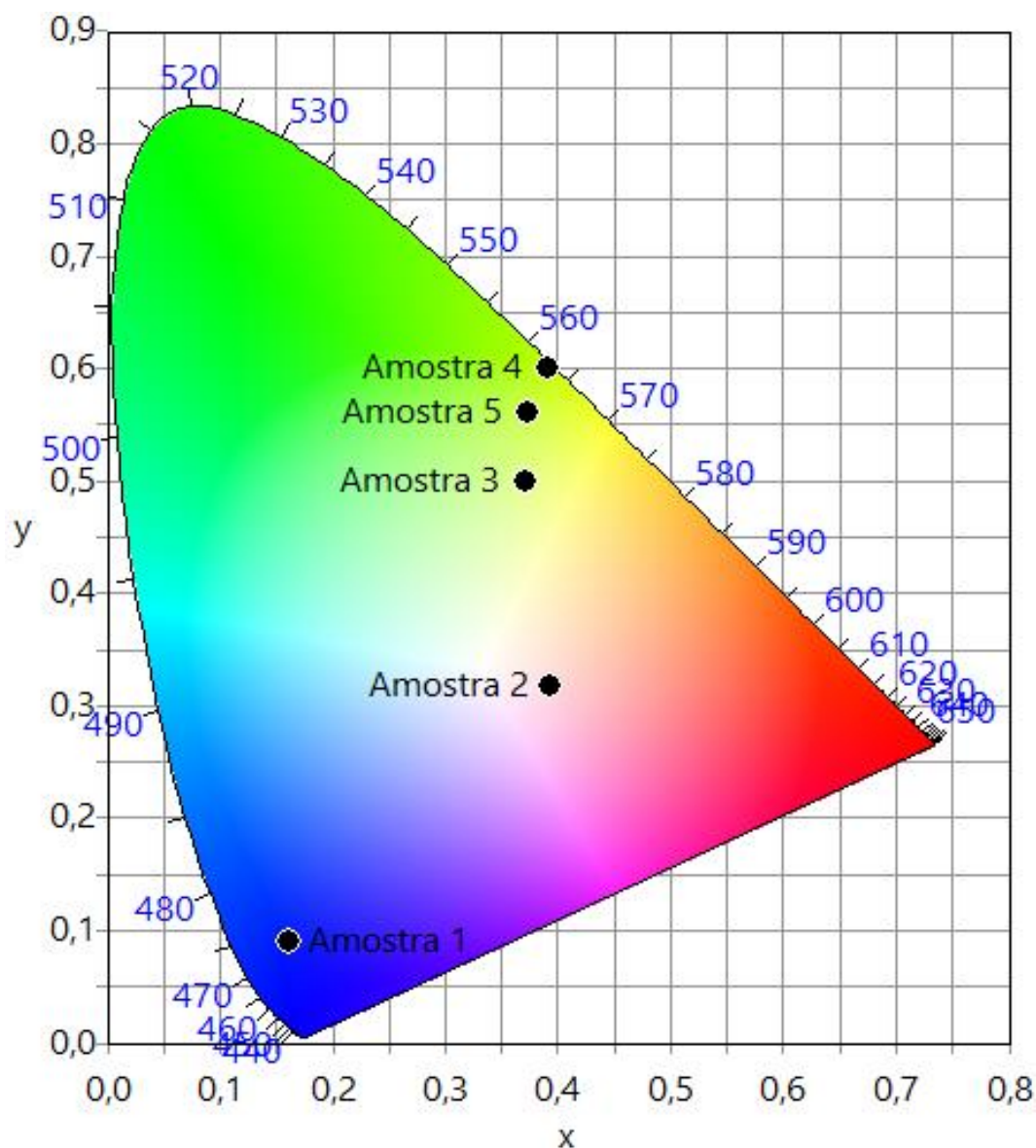
Finalmente é apresentada na Figura 44 uma análise visual das cinco amostras após excitação com laser violeta para posterior comparação com o diagrama de cromaticidade presente na Figura 45.

Figura 44 – Análise visual das cinco amostras excitadas com o laser violeta, em que: **a)** Amostra 1; **b)** Amostra 2; **c)** Amostra 3; **d)** Amostra 4; **e)** Amostra 5.



Utilizando os dados obtidos pela fluorescência via espectrômetro comercial, foi gerado um mapa de cores para as cinco amostras utilizando o *laser* violeta (425 nm) como fonte de excitação. Com esses dados foi gerado o diagrama de cromaticidade para essas amostras apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Diagrama de cromaticidade para as amostras excitadas com *laser* violeta.



Fonte: Próprio Autor.

Para essa fonte de excitação, nota-se tanto no diagrama de cromaticidade, quanto na análise visual, cores com a mesma tendência, sendo: azul para amostra 1; rosa para amostra 2; amarelo-esverdeado para amostra 3 e amarelo verde para as amostras 4 e 5. Vale destacar que essas cores são o resultado da composição dos comprimentos de onda de fluorescência. Apenas após a passagem pelas lentes, e a

devida decomposição pela grade de difração, é que podemos ver o espectro de cores separadamente destacados no espectro de fluorescência da análise anterior.

A partir das análises anteriores, é possível observar que a comparação dos resultados obtidos por meio do espectrômetro comercial está alinhada com as análises visuais do espectrômetro construído. Isso evidencia a eficácia do aparato desenvolvido, indicando que ele é uma alternativa válida para o estudo da fluorescência no contexto educacional. Isso demonstra que ele pode ser utilizado de forma eficiente no ensino, proporcionando uma experiência prática e enriquecedora para os estudantes.

5.2. Resultados dos questionários diagnósticos

Com a aplicação e análise dos questionários diagnósticos pretendeu-se obter um levantamento de dados, que apresentasse uma descrição quantitativa de tendências, atitudes ou opiniões de uma população, através de uma amostragem. Nesse sentido, pela análise dos resultados da amostragem, pode-se inferir, após as análises dos resultados, se a preparação do espectrômetro e sua utilização em sala de aula é uma boa alternativa para estudos de temas relacionados à interação da luz da matéria, bem como os elementos presentes nos espectrômetros, como estudo das lentes, rede de difração, etc.

A coleta de dados se deu em formato *on-line* via *google* formulários. Utilizando esse serviço, podemos analisar rapidamente os resultados estatísticos descritivos e informações em gráficos. Com as respostas assinaladas nos questionários pré-teste e pós-teste foi possível fazer gráficos e histogramas expondo resultados acerca das observações experimentais e explicações de alguns fenômenos físicos relacionados ao tema interação da luz com a matéria presentes em nossa sequência didática. O formulário foi separado em 5 sessões: Ondulatória; Óptica; Luminescência; Espectrômetros; Comentários. Ao total foram respondidas 23 perguntas divididas entre perguntas abertas e perguntas objetivas (fechadas). Nas perguntas abertas o aluno pode redigir uma resposta livremente e nas perguntas objetivas assinalar a resposta correta.

Perguntas abertas apresentam maior dificuldade no momento da tabulação ou análise. Por outro lado, as perguntas abertas acabam fornecendo mais informações

ao pesquisador ^[10]. Dessa forma, analisamos separadamente cada resposta a fim de poder avaliar a presença de possíveis subsunçores no pré-teste, visando uma preparação adequada da sequência didática de forma a sanar as possíveis lacunas no conhecimento dos alunos acerca do conteúdo. Os resultados das perguntas abertas foram apresentados em forma de nuvem de palavras, destacando as palavras que apareceram com maior frequência nas respostas fornecidas pelos alunos. Em contrapartida, as perguntas objetivas são mais fáceis de se responder, tabular e analisar ^[10]. Elas são fundamentais para poder gerar os gráficos e histogramas, a fim de fornecer dados estatísticos sobre a sequência didática, após a comparação dos questionários pré-testes e pós-testes.

A seguir, são apresentadas as perguntas e os resultados obtidos de cada seção do questionário. Uma breve introdução do que se espera com cada seção será detalhada no início, seguida das análises dos autores. Ao final, na seção 5.2.6, serão apresentadas considerações finais de forma mais abrangente sobre os questionários diagnósticos e seus resultados. O questionário diagnóstico completo está presente no apêndice A.3 e também no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

5.2.1. Questões sobre ondulatória

O ensino da ondulatória é um aspecto fundamental do currículo de física. Nesse contexto, buscamos, através dos questionários pré-testes, identificar alguns possíveis subsunçores relevantes a esse tema. Em uma situação ideal para os alunos do segundo ano do ensino médio em meados do final do ano letivo, o conhecimento prévio dos alunos inclui conceitos fundamentais de ondas e suas características gerais, como amplitude, frequência, período e comprimento de onda. As perguntas dessa seção foram voltadas para a identificação desses possíveis conhecimentos prévios nos questionários pré-testes, bem como a consolidação desses possíveis subsunçores e a evolução da turma após a aplicação da sequência didática, feita após avaliação dos questionários pós-testes. Em relação às duas primeiras perguntas do questionário, que foram abertas, seguem as nuvens de palavras obtidas.

relacionados à propagação de ondas. Uma observação relevante é que a palavra "não" é proeminente nas nuvens de palavras dos pré-teste, Figuras 46.a e 47.a, mas menos frequente no pós-teste, indicando que após a sequência didática, os alunos conseguiram expressar com maior domínio exemplos e definições. O quadro 1 ilustra algumas das respostas presentes nos questionários:

Quadro 1 - Respostas das perguntas 1 e 2 presentes nos questionários pré-teste e pós-teste.

1. O que você já entende sobre ondulatória? Dê exemplos que envolvam fenômenos ondulatórios em situações do cotidiano.

Pré-teste:

- Não tenho noção do que seja
- Acho que é sobre ondas sonoras, mas não sei do que se trata.
- Entendo como parte da física que estuda as propriedades e o comportamento das ondas. Alguns exemplos de fenômenos ondulatórios no cotidiano são: ondas sonoras, ondas na água, ondas de rádio, luz, entre outros
- São ondas de rádio, ondas de frequência
- não sei
- Área que voltada para o estudo das ondas, como o som, a internet, sinais de televisão

Pós-teste:

- A ondulatória estuda as ondas, como luz, som e ondas na água. Exemplos disso são o som que ouvimos e as ondas na água quando jogamos uma pedra em um lago.
- ondulatória e a parte da física que estuda as ondas, são exemplos o som a luz
- é uma área da Física cujo objeto de estudo está nas características, propriedades e fenômenos ondulatórios
- Ondulatória é a parte da Física que estuda as ondas. Qualquer onda pode ser estudada aqui, seja a onda do mar, ou ondas eletromagnéticas, como a luz. Por exemplo
- É o estudo das ondas e seus comportamentos. Som, wifi, Bluetooth, micro-ondas

2. Você pode explicar o que é uma onda? Se sim descreva com suas palavras.

Pré-teste:

- Não ou Não sei explicar (4 respostas)
- Uma onde é uma frequência magnética que é como o wi-fi, fazendo ligações entre torres de comunicação etc, para transmitir algo.
- Ondas são tipo um impulso de força que resulta em movimentos. Eu acho.
- é a forma que a energia invisível que sai de um objeto ou pessoa que forma uma frequência específica, uma onda...
- É uma perturbação no meio externo.
- A onda é uma perturbação no meio
- É um meio que transporta energia sem matéria

Pós-teste:

- não sei explicar (2 respostas)
- perturbação que se propaga através do espaço
- Uma onda é uma perturbação oscilante de alguma grandeza física no espaço e periódica no tempo.
- perturbações que se propagam de um lugar para outro através de um meio ou até mesmo no vácuo
- Perturbações em um meio.
- fenômenos que são caracterizados pelo transporte de energia sem movimento real da matéria.

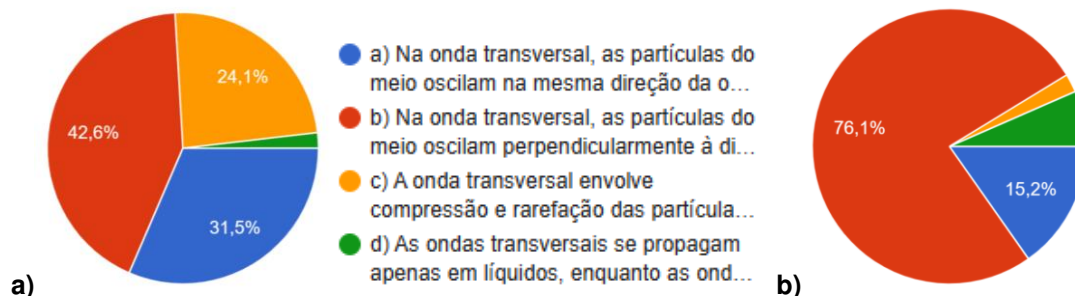
Fonte: Próprio Autor.

Segundo nossas observações, em relação à análise das respostas individuais, observamos que uma parcela da turma apresentou possíveis conhecimentos prévios relacionados aos conceitos fundamentais da ondulatória e no geral percebemos que após a sequência didática, uma grande parte da turma conseguiu expressar com maior domínio exemplos e definições nas respostas dos pós-testes. Além disso, a comparação entre os questionários pré-teste e pós-teste para as demais perguntas, destaca que a sequência didática pode ter consolidado esses possíveis subsunçores, alcançando uma boa parcela dos alunos que melhoraram seu desempenho nas respostas, como evidenciado pelo aumento na porcentagem de acertos nos gráficos das Figuras 48 a 52, cujos resultados serão apresentados a seguir.

3. Qual é a diferença entre uma onda transversal e uma onda longitudinal?

- a) Na onda transversal, as partículas do meio oscilam na mesma direção da onda, enquanto na onda longitudinal, as partículas oscilam perpendicularmente à direção da onda.
- b) Na onda transversal, as partículas do meio oscilam perpendicularmente à direção da onda, enquanto na onda longitudinal, as partículas oscilam na mesma direção da onda.
- c) A onda transversal envolve compressão e rarefação das partículas do meio, enquanto a onda longitudinal envolve oscilação das partículas em relação à direção da onda.
- d) As ondas transversais se propagam apenas em líquidos, enquanto as ondas longitudinais se propagam em sólidos e gases.

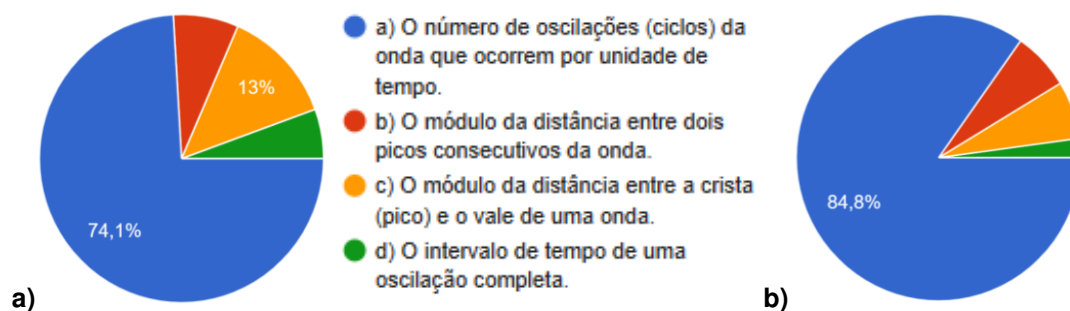
Figura 48 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 3. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste. Alternativas:



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

4. O que a frequência de uma onda representa?

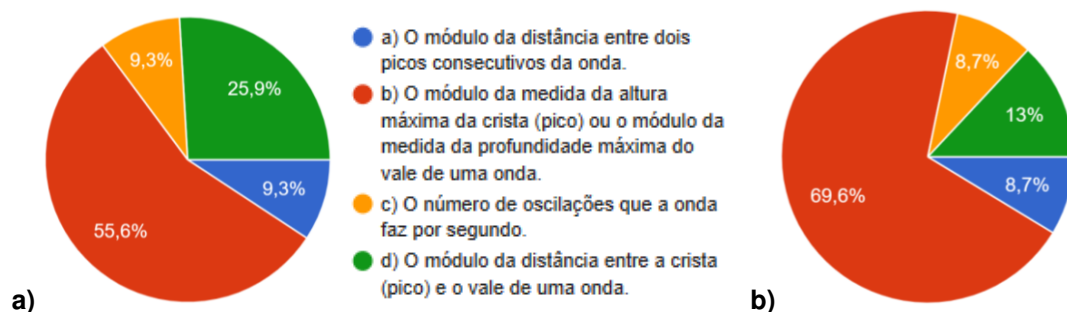
Figura 49 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 4. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

5. O que a amplitude de uma onda representa?

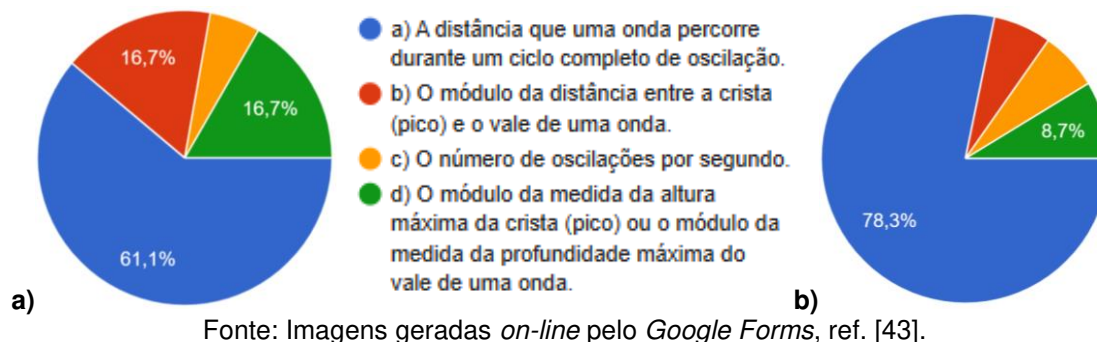
Figura 50 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 5. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

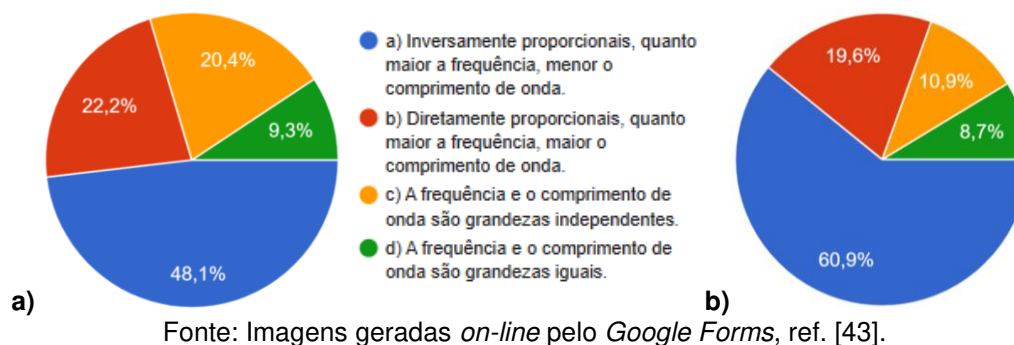
6. Em uma onda, o que representa o comprimento de onda?

Figura 51 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 6. a) Pré-teste. b) Pós-teste.



7. Qual é a relação entre a frequência e o comprimento de onda?

Figura 52 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 7. a) Pré-teste. b) Pós-teste.



Desta forma, a comparação entre os questionários pré-teste e pós-teste das Figuras 48 a 52, destaca uma melhora significativa no desempenho das respostas dos estudantes, evidenciando que a intervenção pedagógica pode ter contribuído para a consolidação dos conceitos relacionados aos princípios básicos da ondulatória. Os resultados apresentados na Figura 52, por exemplo, destacam um aumento no entendimento da relação inversa entre a frequência e o comprimento de onda de uma onda. Em outras palavras, quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência e, conseqüentemente, menor a energia associada. No entanto, o resultado ainda evidencia que uma parcela significativa da turma ainda confunde esse conceito fundamental no estudo da ondulatória. Vale ressaltar que esse ponto foi esclarecido na aula de revisão, de forma a sanar essas dúvidas.

5.2.2. Questões sobre óptica

A abordagem da óptica também constitui um componente essencial do currículo de física. Nesse contexto, buscamos identificar alguns possíveis subsunçores relevantes a esse tema por meio dos questionários pré-testes. Para os alunos do segundo ano do ensino médio, aproximadamente no final do ano letivo, espera-se que o conhecimento prévio inclua conceitos fundamentais de óptica, tais como absorção, reflexão, refração, dispersão, comportamento de lentes e grades de difração, entre outros. Em relação a esse tema, as respostas da primeira pergunta são apresentadas no formato de nuvens de palavras, conforme mostrado na Figura 53.

8. Você pode mencionar exemplos de aplicações práticas das lentes no cotidiano e na tecnologia?

Figura 53 – Nuvens de palavras geradas com as respostas dos alunos referentes à questão 8. a) Pré-teste. b) Pós-teste.

a)



b)



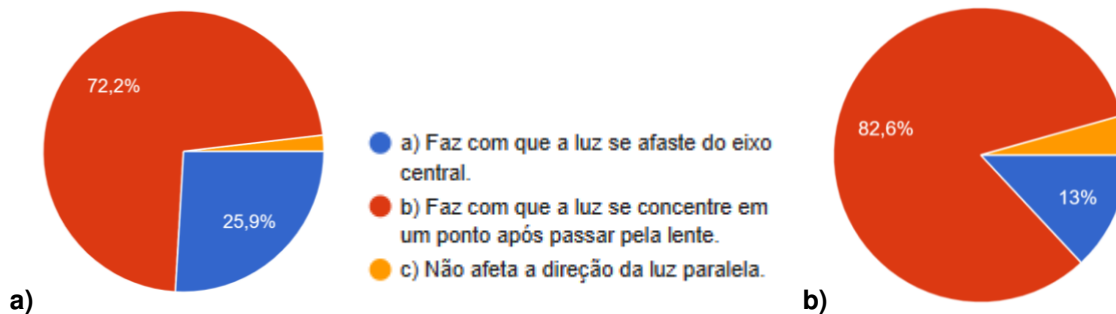
Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Wordart*, ref. [42].

Através da pergunta aberta, refletida na nuvem de palavras da Figura 53, é possível observar que os alunos demonstraram familiaridade com exemplos de lentes no cotidiano e na tecnologia, mencionando termos como "óculos", "câmera", "lupa", "telescópio", "microscópio", entre outros. Novamente, a palavra "não" é destacada na nuvem de palavras do pré-teste, Figura 53.a, mas não se destaca no pós-teste. Isso sugere que após a sequência didática, os alunos tiveram uma compreensão mais clara ao citar exemplos de aplicação das lentes.

Uma grande parte da turma apresentou possíveis subsunçores relacionados aos conceitos fundamentais das lentes, como o ponto focal, e conseguiu fazer uma distinção adequada entre lentes convergentes e divergentes como é apresentado nas Figuras 54 a 56.

9. O que uma lente convergente faz com a luz paralela que a atinge?

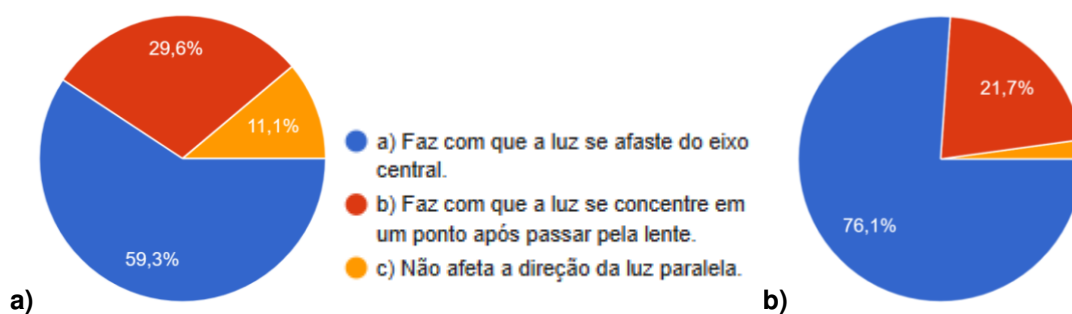
Figura 54 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 9. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

10. O que uma lente divergente faz com a luz paralela que a atinge?

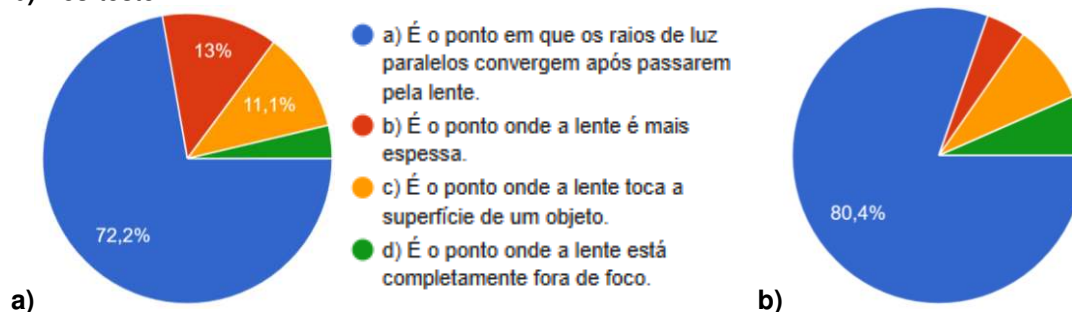
Figura 55 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 10. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

11. O que é o ponto focal em uma lente?

Figura 56 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 11. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

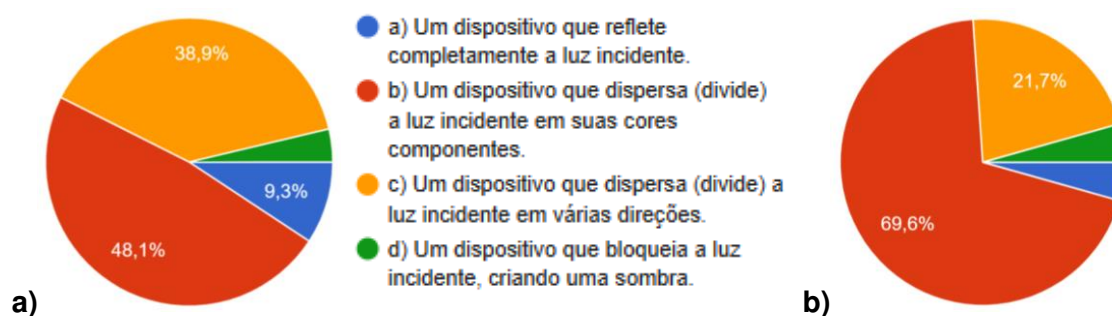
A comparação entre os questionários pré-testes e pós-testes destaca que a sequência didática pode ter consolidado esses possíveis subsunçores, alcançando uma boa parcela dos alunos que melhoraram seu desempenho nas respostas, conforme evidenciado pelo aumento na porcentagem de acertos nos gráficos obtidos com as respostas objetivas e apresentados nas Figuras 54 a 56.

Os resultados das questões relacionadas à rede de difração, apresentadas nas Figuras 57 e 58 a seguir, são intrigantes. Ao analisá-los, observa-se que esse componente não é muito comum no cotidiano dos estudantes. Em conversas com alguns alunos, foi perceptível que as novas gerações possivelmente não têm um contato direto com CDs e DVDs. Esse contexto pode evidenciar uma mudança significativa na forma como as pessoas consomem e interagem com a mídia digital. As gerações mais antigas, que cresceram durante a popularização dos CDs e DVDs, estão familiarizadas com a compra, armazenamento e reprodução física desses meios.

Por outro lado, as gerações mais jovens cresceram em uma era dominada pelo *streaming* de música e vídeo, onde a posse física desses formatos se tornou cada vez menos comum. Isso sugere uma transformação nas preferências e nos hábitos de consumo, influenciada pela evolução tecnológica e pela conveniência oferecida pelas plataformas de *streaming*.

12. O que é uma rede de difração?

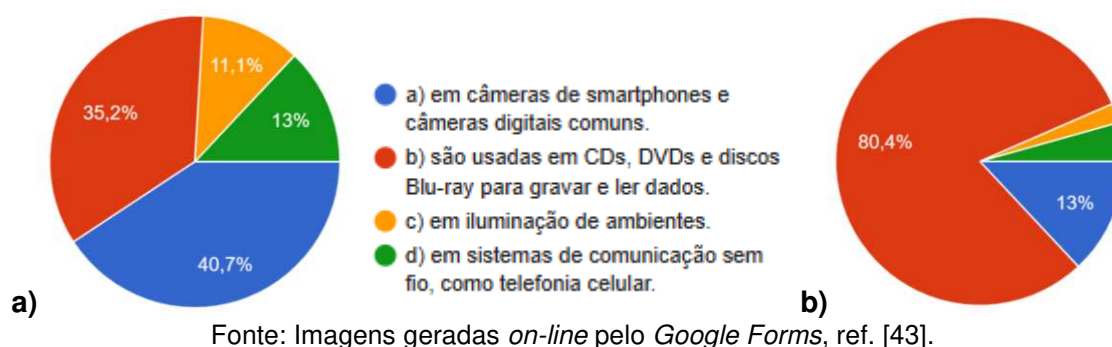
Figura 57 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 12. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

13. As redes de difração são comumente usadas em várias áreas da ciência e tecnologia e em aplicações no cotidiano. Marque a alternativa correta sobre um exemplo de aplicação da rede de difração no cotidiano:

Figura 58 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 13. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



A utilização do espectrômetro e a explicação do funcionamento dos CDs nas aulas podem ter contribuído significativamente para o aumento na porcentagem de acertos dessas questões. O uso do espectrômetro permitiu aos alunos uma experiência prática e visual da dispersão da luz, reforçando conceitos teóricos apresentados anteriormente. Além disso, a explicação do funcionamento dos CDs, que também se baseia em princípios ópticos relacionados à difração, pode ter ajudado os alunos a fazer conexões entre teoria e prática, facilitando a compreensão dos fenômenos ópticos abordados. Essas atividades práticas e exemplos concretos provavelmente tornaram o conteúdo mais tangível e interessante para os alunos, contribuindo assim para uma melhor compreensão e retenção dos conceitos apresentados.

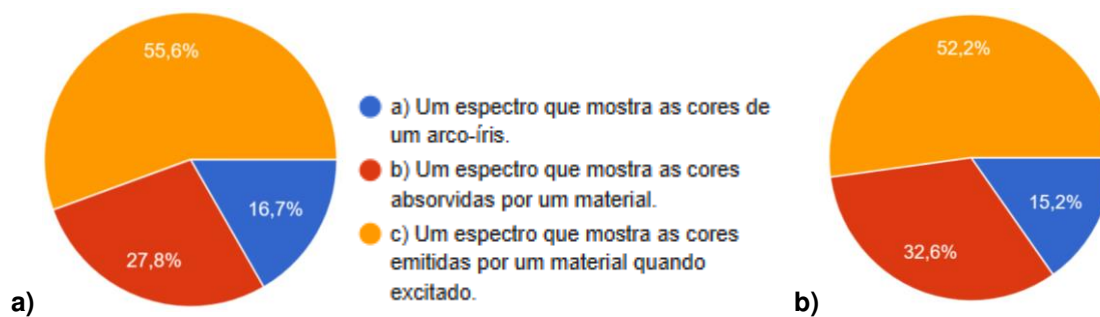
5.2.3. Questões sobre luminescência

O ensino da luminescência é um componente muitas vezes pouco explorado no currículo de física do ensino médio. Compreender as propriedades e comportamentos da luz emitida é crucial para explicar vários fenômenos do cotidiano, desde o funcionamento de lâmpadas fluorescentes, até o brilho de pulseiras neon (*glow sticks*) comuns em algumas festas. Embora a luminescência não seja tão amplamente abordada, as perguntas desta seção foram voltadas para identificação desses possíveis conhecimentos prévios relevantes relacionados a características gerais da luminescência, por meio dos questionários pré-testes.

turma conseguiu relacionar corretamente, porém uma parcela significativa confundiu emissão e absorção tanto no pré-teste quanto no pós-teste. A ausência de apresentação de um espectro de absorção na sequência didática pode ter contribuído para a persistência desse erro. Vale ressaltar que esse ponto foi esclarecido na aula de revisão construtiva em que houve a correção dos questionários, de forma a sanar essas dúvidas.

15. O que é um espectro de emissão?

Figura 60– Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 15. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.

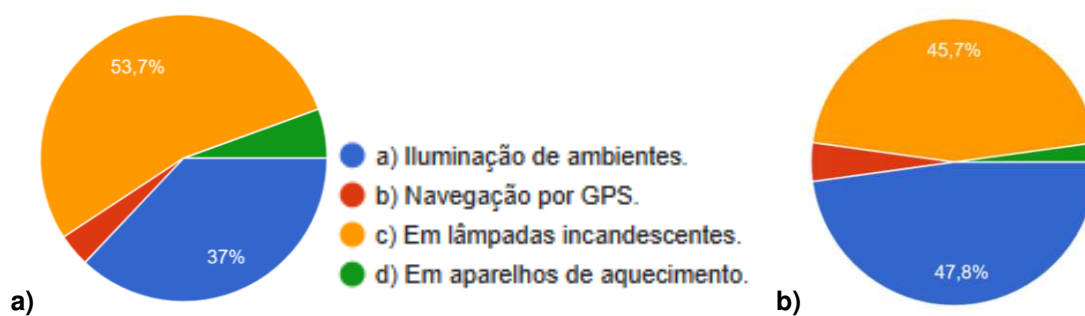


Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

Os resultados para a questão apresentada na Figura 61 indicam a persistência do equívoco ao associar a fluorescência às lâmpadas incandescentes. Uma possível explicação para isso pode estar no fato de que essas lâmpadas são menos utilizadas atualmente, devido ao seu alto consumo de energia elétrica em comparação com as lâmpadas fluorescentes e LEDs, que são mais eficientes. Como resultado, os alunos podem ter menos exposição ou experiência com lâmpadas incandescentes, o que pode levar a essa associação equivocada com a fluorescência. Outra possível razão pode ser a de que os alunos ainda não foram introduzidos ao estudo do eletromagnetismo, geralmente abordado no terceiro ano do ensino médio. Um aprimoramento do entendimento sobre resistores e o efeito Joule poderá esclarecer essa dúvida. Vale ressaltar que esse ponto foi esclarecido na aula de revisão construtiva em que houve a correção dos questionários, de forma a sanar essas dúvidas.

16. Qual das seguintes opções é uma aplicação típica da fluorescência?

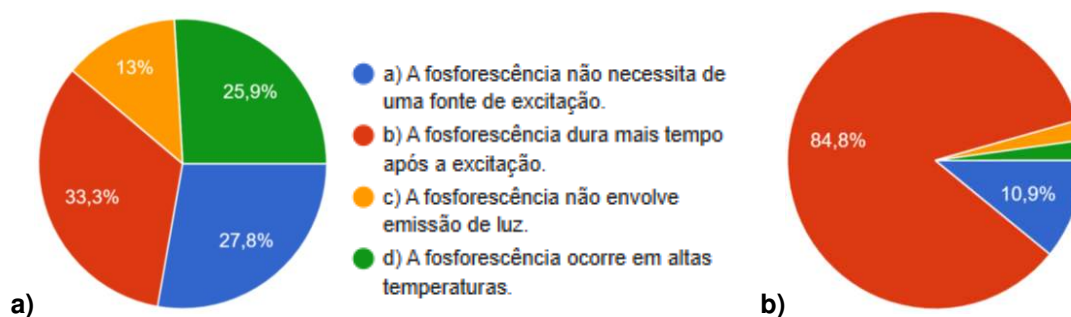
Figura 61 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 16. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

17. Qual é a característica distintiva da fosforescência em relação à fluorescência?

Figura 62 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 17. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

Os resultados da Figura 62 merecem destaque, pois as evidências do pós-teste indicam que os alunos conseguiram compreender de maneira satisfatória uma das características distintivas da fosforescência em relação à fluorescência. Os experimentos envolvendo a lâmpada de luz negra e os materiais fluorescentes e fosforescentes despertaram o interesse dos alunos durante a aula experimental, o que pode ter contribuído para uma melhor compreensão desse ponto.

Finalmente, apresentamos os histogramas destacados na Figura 63. Os resultados demonstram uma redução significativa nas afirmações incorretas: "A conversão de luz solar em energia química pelas plantas" e "A formação de cristais a partir de soluções". Embora a sequência didática não aborde diretamente a fotossíntese e a formação de cristais, os alunos podem ter compreendido melhor o tema e possivelmente perceberam que esses exemplos não estão relacionados à

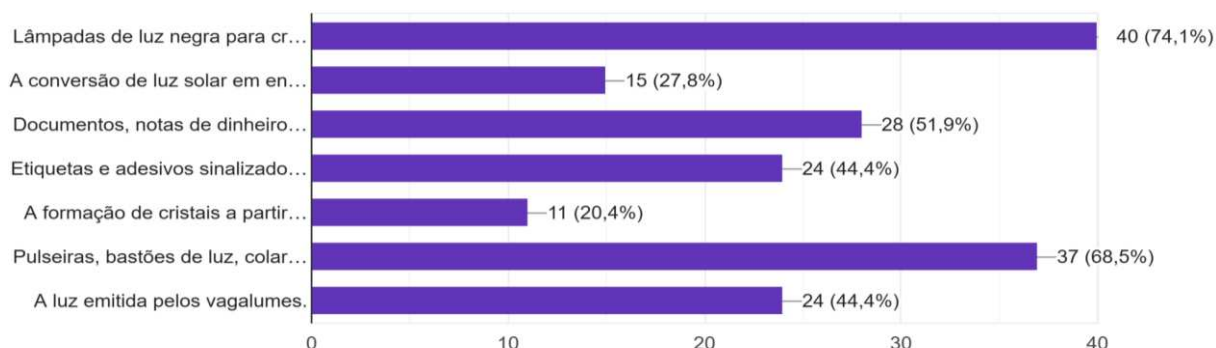
luminescência. Além disso, a exploração dos demais exemplos durante a sequência didática pode ter contribuído para essa redução.

18. Marque as alternativas que trazem alguns exemplos práticos de luminescência:

- () Lâmpadas de luz negra para criar efeitos visuais brilhantes em festas.
- () A conversão de luz solar em energia química pelas plantas.
- () Documentos, notas de dinheiro e cartões de identificação com marcas detectadas sob luz ultravioleta.
- () Etiquetas e adesivos sinalizadores de segurança.
- () A formação de cristais a partir de soluções.
- () Pulseiras, bastões de luz, colares, e outros acessórios que proporcionam uma fonte de luz temporária.
- () A luz emitida pelos vaga-lumes.

Figura 63 – Histogramas gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 18. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.

a)



b)



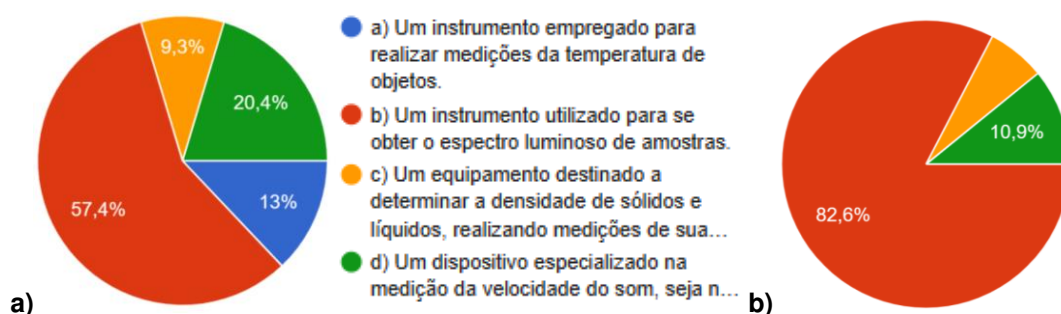
Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

5.2.4. Questões sobre espectrômetros

As questões desta seção foram formuladas para identificar, por meio dos questionários pré-teste, possíveis conhecimentos prévios relevantes relacionados às características gerais dos espectrômetros, além da utilização desses instrumentos na análise da fluorescência de materiais. Com os questionários pós-testes, almejamos observar a consolidação desses possíveis subsunçores e a evolução da turma após a sequência didática. Os resultados obtidos para as questões referentes a esse tema encontram-se dispostos nas Figuras 64 a 66.

19. O que é um espectrômetro?

Figura 64 – Gráficos gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 19. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

Em relação às respostas apresentadas no pré-teste, presente na Figura 64.a, se percebe que uma considerável parcela da turma demonstra falta de compreensão em relação ao conceito de espectrômetro, distribuindo-se entre as alternativas incorretas. Para essa questão, o resultado do questionário pós-teste, presente na Figura 64.b, assume uma importância fundamental, visto que revela um aumento significativo na porcentagem de acertos, chegando a eliminar uma das alternativas incorretas associadas à medição de temperatura. Esse incremento expressivo pode ser atribuído a sequência didática aplicada, ressaltando sua eficiência e, também, a importância da demonstração experimental envolvendo o espectrômetro construído.

Os histogramas apresentados a seguir, Figuras 65 e 66, também desempenham um papel expressivo para os resultados de nossa pesquisa. Ao

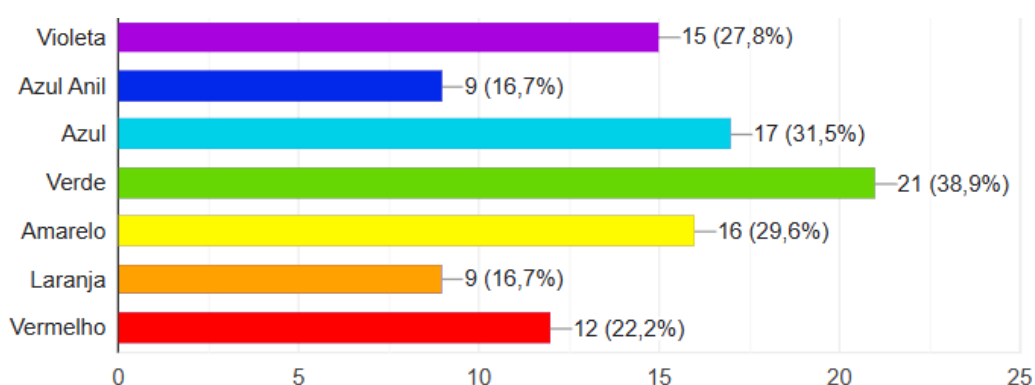
analisar os pré-testes, é observado uma certa aleatoriedade nas respostas sobre as cores esperadas em um espectro de emissão após a incidência do feixe *laser*. Essa variabilidade era prevista pelos autores, uma vez que, até aquele momento, os estudantes não haviam participado do experimento. Em contraste, os resultados no pós-teste são altamente significativos no que diz respeito à uma melhor compreensão do fenômeno da fluorescência e ao funcionamento do espectrômetro.

Como já mencionado, a energia da emissão é tipicamente menor que a da absorção, sendo assim, a fluorescência normalmente ocorre em energias mais baixas ou comprimentos de onda maiores que da fonte de excitação. Os resultados apresentados no pós-teste (Figura 65.b) revelam que a maioria dos alunos compreendeu que, ao utilizar o *laser* verde, é esperado visualizar no espectro de emissão cores de comprimento de onda maior, como amarelo, laranja e vermelho, além da própria reflexão do *laser* verde. Da mesma forma, os resultados do pós-teste (Figura 66.b) indicam que a maioria dos alunos compreendeu que, ao utilizar o *laser* violeta, é esperado visualizar no espectro de emissão cores de comprimento de onda maior, abrangendo o espectro visível completo. Esses resultados foram observados pelos alunos durante a aula experimental, em que visualizaram no anteparo do espectrômetro construído os espectros obtidos para as amostras de papel de nota excitadas pelos *lasers* verde e violeta.

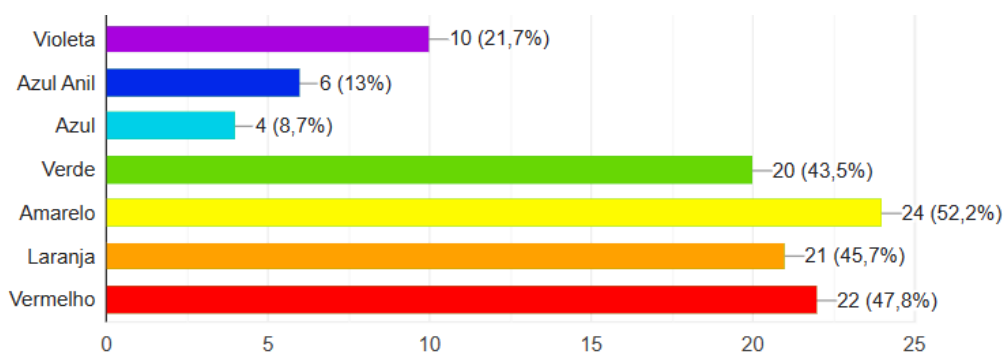
20. Ao incidir um laser verde em um papel de nota colorido, quais cores se espera ver além da cor incidente em um espectro de emissão?

Figura 65 – Histogramas gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 20. **a)** Pré-teste. **b)** Pós-teste.

a)



b)

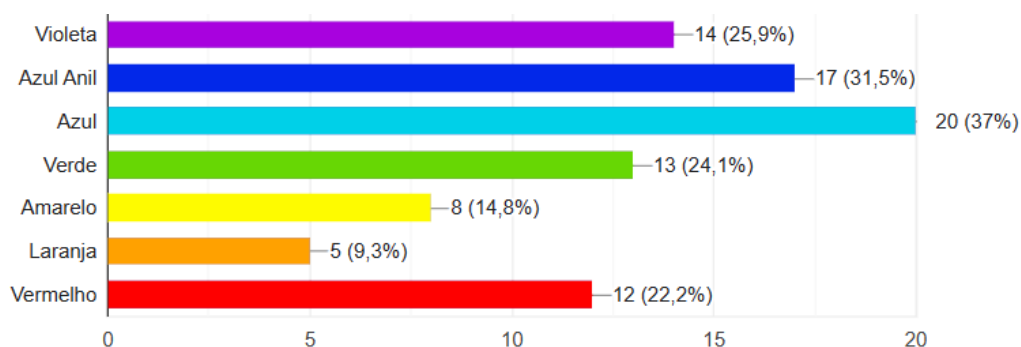


Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

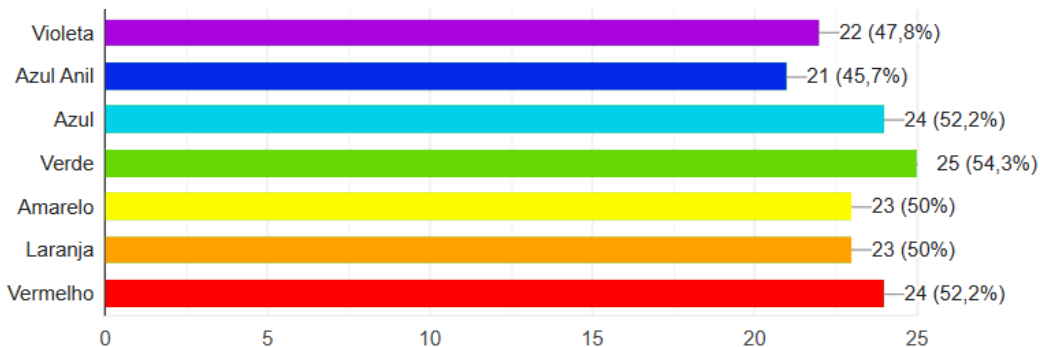
21. Ao incidir um laser violeta em um papel de nota colorido, quais cores se espera ver além da cor incidente em um espectro de emissão?

Figura 66 – Histogramas gerados com as respostas dos alunos referentes à questão 21. a) Pré-teste. b) Pós-teste.

a)



b)



Fonte: Imagens geradas *on-line* pelo *Google Forms*, ref. [43].

Os resultados obtidos nessa seção demonstram a eficácia da abordagem experimental no ensino da óptica, especificamente no contexto da fluorescência e espectroscopia. Através da construção e utilização de um espectrômetro de baixo

O termo "não" se destaca na nuvem de palavras da Figura 67.a, sugerindo possivelmente respostas indicando a ausência de dúvidas ou comentários. Entretanto, expressões como "posso dúvida" e "não sabia" sobressaem nessa pergunta, indicando que os alunos podem ter apresentado incertezas em relação ao questionário, talvez devido à natureza menos explorada do tema no ensino médio.

Ainda em relação à questão 22, observamos, por meio de algumas respostas, que os alunos manifestaram diversas dúvidas em relação ao questionário. Alguns exemplos são destacados no Quadro 2. Conforme mencionado, essa disciplina não é amplamente abordada no ensino médio, e era esperado que essa dificuldade surgisse. No entanto, é crucial ressaltar que esse formulário desempenhou um papel fundamental na avaliação dos possíveis subsunçores, na identificação dos conhecimentos prévios e nas principais dificuldades dos alunos. Além disso, os alunos foram informados de que as dúvidas seriam abordadas na sequência didática.

Quadro 2 – Respostas anônimas de alguns alunos(as) sobre a pergunta 24 presente no questionário pré-teste.

Respostas à pergunta 22: Você tem alguma dúvida referente às questões deste questionário diagnóstico? Algum comentário pertinente?

- “Quase tudo”
- “Não possuo nenhuma dúvida, estou ciente que errei quase tudo.”
- “ainda não estudamos sobre todos os assuntos do questionário”
- “Não entendi nada !!!!”
- “Eu observei que não sei muito sobre essas coisas e como fazem diferença no nosso dia a dia”
- “Nunca estudei sobre a maioria das coisas, mas tenho algumas ideias distantes sobre o assunto”
- “Na parte de lasers e cores tive uma dificuldade em entender como responder a questão mais pela falta de conhecimento.”
- “Eu creio que é preciso aprofundar em vários assuntos e retomar em outros mas de uma forma mais prática e menos teórica igual é feita ultimamente em sala de aula.”
- “Não. Mas parabéns pela dedicação aos estudos, eu admiro muito os pesquisadores por entenderem e estudarem coisas relacionadas a física.”

Em contraste, as palavras e expressões "muito", "experimento", "bom", "boa aula" e "legal" são proeminentes na nuvem de palavras da Figura 67.b referente à questão 23. Nessa questão, notamos um contraste significativo, pois as respostas foram bastante estimulantes e motivadoras. Elas destacam a importância de se incorporar experimentos e sequências didáticas interativas, evidenciando que tais abordagens podem ser produtivas e constituem uma boa maneira de despertar o interesse dos alunos para os conteúdos abordados em sala de aula. Alguns exemplos são destacados no Quadro 3.

Quadro 3 – Respostas anônimas com comentários sobre a sequência didática.

Respostas à pergunta 23: Você tem algum comentário referente a sequência didática e aos experimentos realizados?

- “Não, muito bom a didática!”
- “Eu gostei bastante da sequência didática, muito mais fácil de compreender a matéria.”
- “fazer atividades mais práticas igual foi a parte de testes do experimento.”
- “a aula sobre os experimentos foi muito interessante e ajudou a entender muito mais a matéria”
- “Não tenho nada. “Gostei de uma metodologia ativa e experimentos”
- “Foi divertido”
- “Foi legal”
- “Foi muito legal”

Fonte: Próprio Autor.

5.2.6. Considerações finais sobre os questionários diagnósticos

Como Ausubel destaca em sua Teoria da Aprendizagem Significativa, para ocorrer a aprendizagem significativa, deve existir tanto uma disposição do aluno para a aprendizagem significativa como a apresentação ao aluno de um material potencialmente significativo. [4] Neste presente trabalho apresentamos uma proposta de material que atenda essa característica, porém, Ausubel deixa claro que não basta apenas que o material de aprendizagem seja potencialmente significativo, deve haver, também, uma disposição para a aprendizagem significativa. Ou seja, mesmo o material de aprendizagem consistindo em componentes significativos, o mesmo pode

ser aprendido pelo método de decorar (aprendizagem mecânica), se a disposição do aluno para aprender não for significativa [4].

Apesar da motivação dos alunos, por parte do autor/professor, e da preparação interativa da sequência didática, a análise gráfica e as respostas abertas sugerem que alguns estudantes talvez não tenham sido totalmente alcançados. Conforme detalhado na metodologia, os questionários foram concebidos para serem anônimos, visando minimizar riscos de quebra de sigilo e proporcionar conforto caso os alunos se deparassem com questões didáticas desconhecidas. Nesse contexto, não é possível identificar, e isso não constitui o foco deste trabalho, quais alunos possivelmente manifestaram desinteresse ao copiar respostas da internet ou simplesmente marcar qualquer alternativa nos questionários, nem se esse padrão se manteve no pré-teste e pós-teste.

A utilização de formulários *on-line* evidencia essa vulnerabilidade. Apesar das instruções do autor/professor, que enfatizaram a necessidade de respostas redigidas pelos próprios alunos, e da supervisão presencial durante o preenchimento, algumas respostas foram copiadas diretamente da internet. Foram poucos casos observados e exemplos específicos são destacados no Quadro 4. A prática de plágio pode ser facilmente identificada através de uma simples pesquisa na internet.

Quadro 4 – Exemplos de respostas copiadas da *internet*.

Resposta à pergunta 1: O que você já entende sobre ondulatória? De exemplos que envolvam fenômenos ondulatórios em situações do cotidiano.

- “é a parte da física que estuda os fenômenos relativos às ondas. Ondulatória é a parte da física que estuda todos os tipos de ondas, sejam elas eletromagnéticas, como a luz, ou mecânicas a exemplo das oscilações que ocorrem na superfície das águas, que é o caso das ondas marítimas.”

Resposta à pergunta 9: Você pode mencionar exemplos de aplicações práticas das lentes no cotidiano e na tecnologia?

- “lentes são dispositivos ópticos que funcionam por refração da luz e são muito utilizadas no nosso dia a dia, como nos óculos, nas lupas, nas câmeras fotográficas, nas filmadoras e em telescópios.”

Resposta à pergunta 14: Você pode dar exemplos de materiais ou substâncias que exibem fluorescência?

- “Âmbar: mostram radiação de cor laranja quando recebem luz ultravioleta de onda curta. Diamantes e rubis da esperança: exibem radiação vermelha quando irradiados com radiação ultravioleta de onda curta.”

Fonte: Próprio Autor.

Outro aspecto relevante observado nas respostas da questão 25 é que a abordagem por meio de questionários pode se tornar fatigante para alguns alunos. Destacamos no Quadro 5 duas respostas específicas da seção que demandam atenção:

Quadro 5 – Respostas anônimas de um aluno(a) sobre os questionários.

Respostas à pergunta 23: Você tem algum comentário referente a sequência didática e aos experimentos realizados?

- “As aulas foram legais, os experimentos ajudam a entender, mas responder os questionários são chatos”
- “Formulário muito bom”

Fonte: Próprio Autor.

Observando presencialmente, percebi que o primeiro questionário foi bem recebido pelos alunos, enquanto o segundo encontrou uma resistência um pouco maior para ser preenchido. Isso pode ser atribuído pelo fato de ter sido aplicado ao final do ano letivo e uma semana após as provas do Enem, quando os alunos estavam cansados e ocupados com atividades relacionadas às feiras escolares. Pessoalmente, reconheço que responder questionários pode ser fatigante, mas ressalto que sua aplicação foi fundamental para nossas análises. Em todo caso, o *feedback* positivo destacado no Quadro 5 sugere que o questionário pós-teste pode ter sido uma ferramenta interessante para alguns alunos avaliarem sua evolução individual em relação ao conteúdo.

Uma abordagem semelhante poderia ser aplicada no terceiro ano do ensino médio, visando uma análise voltada para a física moderna. Para esse caso seria necessário adaptar a sequência didática pensando em subsunções relacionadas a essa área de ensino, como, por exemplo, o conceito de fótons, relação proporcional da energia de um fóton com a frequência, etc. O espectrômetro construído é uma boa

opção para se discutir esse tema auxiliando no entendimento desses conceitos muitas vezes pouco explorados no currículo de física do ensino médio. Caso o leitor tenha interesse em aprofundar nesse assunto, recomendo a dissertação “Uma abordagem didática alternativa ao ensino conceitual da dualidade onda-partícula no ensino médio”, do autor PIMENTEL, R.F, disponível na ref. [44].

6. CONCLUSÕES

O espectrômetro construído revelou que as bandas de fluorescência de diferentes corantes apresentam padrões distintos e que a fluorescência envolve a emissão de comprimentos de onda maiores que os da fonte de excitação. O experimento mostrou, também, que os comprimentos de onda observados não mudam com a mudança da fonte de excitação, mas que uma fonte de menor comprimento de onda permite a observação de novos comprimentos de onda de fluorescência. Em razão disso, os resultados para excitação no violeta são muito significativos, pois envolvem um espectro de fluorescência mais completo para as amostras. As faixas de cores obtidas no espectrômetro puderam ser calibradas com base nas medidas de um espectrômetro comercial. Dessa maneira, se verifica que os resultados do espectrômetro comercial corroboram com as análises visuais do espectrômetro construído, demonstrando que o aparato é uma boa alternativa para se estudar a fluorescência no contexto do ensino médio.

Para fins didáticos, nosso aparato experimental apresentou bons resultados, elucidando o funcionamento de dispositivos ópticos e dos fenômenos de luminescência para estudantes do segundo ano do ensino médio. O diferencial do nosso espectrômetro está na simplicidade de sua construção e montagem, sendo um dispositivo compacto e móvel, o que facilita sua utilização em ambiente escolar. Além disso, ele aborda os princípios básicos da óptica presentes nos currículos básicos do ensino médio. A análise visual direta das cores do espectro de emissão no anteparo é fascinante, pois o senso comum pode levar a esperar que apenas a cor do *laser* incidente seja observada. Dessa forma, nosso aparato construído se mostrou uma boa opção para esclarecer os princípios básicos da fluorescência.

A utilização do Ciclo de Experiência Kellyana foi fundamental para organização da sequência didática tendo em vista o contexto de aplicação da intervenção. Ao vivenciar diretamente as demonstrações experimentais, os alunos tiveram a oportunidade de refletir sobre as ideias previamente construídas nas primeiras aulas da sequência. Através da análise dos questionários diagnósticos pré-testes e pós-testes, observaram-se resultados positivos que destacam uma evolução na turma após a implementação da sequência. Esses resultados ressaltam a relevância de considerar os possíveis conhecimentos prévios (possíveis subsunçores) dos alunos

ao desenvolver sequências didáticas, além de introduzir a experimentação no contexto do cotidiano escolar.

Finalmente, os resultados demonstram a importância dos experimentos em sala de aula para a aprendizagem dos alunos. Na aula experimental, foi possível perceber o entusiasmo dos alunos pelo assunto devido à abordagem, o que fez com que a aula se tornasse mais produtiva. Ao término da intervenção, em conversas com os alunos, ficou claro que a realização de experimentos foi fundamental para a compreensão do fenômeno da fluorescência, especialmente no que se refere à motivação. Isso os estimulou a continuar os estudos, relacionando o que foi observado com toda a parte teórica explorada. Isso nos leva a acreditar que o espectrômetro construído constitui um material didático potencialmente significativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOREIRA, Marco Antonio. "O Que É Afinal Aprendizagem Significativa?". Instituto de Física – UFRGS – Campus Porto Alegre – RS. 2012.
- [2] AUSUBEL, David P. "The acquisition and retention of knowledge". Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2000.
- [3] NOVAK, J. D. "A Theory of Education". Ithaca: Cornell University Press. 1977.
- [4] AUSUBEL, David P.; NOVAK, Joseph D.; HANESIAN, Helen. "Psicologia educacional". Tradução: Eva Nick. Rio de Janeiro: Editora Interamericana Ltda. 1980.
- [5] CANDIDO, Marliete S. "Seres Vivos: Sequência didática para o ensino fundamental inspirada na teoria da Aprendizagem significativa e no modelo rotacional". Universidade Estadual De Roraima-UERR. 2018.
- [6] KELLY, George A. "A brief introduction to personal construct theory". Brandeis University, Waltham, MA, USA.
- [7] SILVA, Ana Paula Teixeira Bruno; BASTOS, Heloisa Flora Brasil Nóbrega. "Uma proposta metodológica para o estágio curricular supervisionado na EAD: articulações entre CEK e Grupo Cooperativo". UNESP, Ciência & Educação (Bauru), 2017.
- [8] KEENAN, Tim, reviewer. "Stein, Sherman; Archimedes: What Did He Do Besides Cry Eureka? The Mathematical Association of America, 1999." 2007. Disponível em: <https://maa.org/press/periodicals/convergence/archimedes-what-did-he-do-besides-cry-eureka>; Acesso em: agosto de 2023.
- [9] CLONINGER, Susan C. "Teorias da personalidade". São Paulo: Martins Fontes, 1999.
- [10] MOREIRA, Marco Antonio; ROSA, Paulo Ricardo da Silva. "Uma Introdução à Pesquisa Quantitativa em Ensino". Instituto de Física – UFRGS; Departamento de Física – UFMS. 2008.
- [11] CRESWELL, John W. "Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto". Tradução Magda Lopes. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.
- [12] HUNT, R.W.G; POINTER, M.R. "Measuring Colour". 1923. Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology. 4th ed.

- [13] LOUDEN. Gravura de meados do Século XIV. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.pt/medio/import/attachment/edicoesespeciais/GrandePersonagens/IsaacNewton/i6.png>; Acesso em: julho de 2023.
- [14] MARINS, Roberto de A. (tradução). "Tratado sobre a luz". Cadernos de História e Filosofia da Ciência, Campinas, Suplemento 4, p. 1-99, 1986. Disponível em: <https://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/issue/view/229>; Acesso em: julho de 2023.
- [15] GRIFFITHS, D. J. "Introduction to Electrodynamics". 3ª ed. Prentice Hall, 1999.
- [16] YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. "Física IV: Sears e Zemansky: ótica e física moderna". Colaborador: FORD, A. Lewis. Tradução Daniel Vieira. Revisão técnica Adir Moysés Luiz. 14 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- [17] EISBERG, R. M.; RESNICK, R. "Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas". Editora Campus; Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.
- [18] CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. "Origens do Conceito de Fóton". Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.
- [19] "MLA style: The Nobel Prize in Physics 1921". NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2023. Sat. 2 Dec 2023. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>; Acesso em: julho de 2023.
- [20] CHODOS, Alan. "This Month in Physics History: Gilbert Lewis coins "photon" in letter to Nature". AMERICAN PHYSICAL SOCIETY; APS News. Disponível em: <https://www.aps.org/publications/apsnews/201212/physicshistory.cfm>; Acesso em: julho de 2023.
- [21] MUTHUKRISHNAN, Ashok; SCULLY, Marlan O.; ZUBAIRY, M. Suhail. "The concept of the photon - revisited". Institute for Quantum Studies and Department of Physics, Texas A&M University, College Station. Disponível em: https://indico.cern.ch/event/774733/contributions/3614271/attachments/1944496/3225666/MSZ03_the_concept_of_the_photon_-_revisited.pdf; Acesso em: julho de 2023.
- [22] LAKOWICZ, Joseph R. "Principles of Fluorescence Spectroscopy" 3ª Edition. Editora Springer. University of Maryland School of Medicine Baltimore, Maryland, USA. 2006.

- [23] PAUN, Matthias Stephan. "Single Crystal Growth of High Melting Oxide Materials by Means of Induction Skull-Melting". *Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Berlin*. Berlin, Alemanha. 2015.
- [24] BERNARD, Valeur. "Molecular Fluorescence". Wiley-VCH Verlag GmbH, New York. 2001.
- [25] BERNARD, Valeur; BERBERAN-SANTOS, Mario N. "A Brief History of Fluorescence and Phosphorescence before the Emergence of Quantum Theory". Disponível em: https://chemistry.as.miami.edu/_assets/pdf/murthy-group/8-history-of-luminescence-jce.pdf ; Acesso em: julho de 2023.
- [26] GARCIA, Benito del Castillo. Dossiê: Fontes para a História da Ciência, *History of luminescence*. Vol. 12 (2012). Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/circumhc/article/view/13367> ; Acesso em: julho de 2023.
- [27] HENRIQUES, César Augusto Silva. Síntese de meso-porfirinas mistas: estudos fotofísicos e térmicos - Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-218-Diagrama-de-Jablonski-indicando-os-processos-fotofisicos-fluorescencia_fig15_277808164 ; Acesso em: julho de 2023.
- [28] HORIBA SCIENTIFIC. "Spectrometers, Monochromators and Spectrographs". Disponível em: <https://www.horiba.com/usa/scientific/technologies/spectrometers-and-monochromators/spectrometers-monochromators-and-spectrographs/> ; Acesso em: julho de 2023.
- [29] GREGORCIC, Bor; BODIN, Madelen. "Algodoo: A tool for encouraging creativity in physics teaching and learning". In: *The Physics Teacher*, 55 (1), pp. 25–28, 2017. Disponível em: <http://www.algodoo.com/what-is-it/>. Acesso em: outubro de 2023.
- [30] V1ADIS1AV. Own work. "A diagram of stimulated emission". Wikimedia Commons. 2008. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stimulated_Emission.svg ; Acesso em: julho de 2023.
- [31] NAVE, Rod. "HyperPhysics: Diffraction Grating". Department of Physics and Astronomy - Georgia State University. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html> ; Acesso em: julho de 2023.

[32] FERRARO, Nicolau Gilberto; TORRES, Carlos Magno A.; PENTEADO, Paulo Cesar M. "Física, volume único". 2º ed. Editora Moderna (Veredas Digital). São Paulo, SP, Brasil. 2017.

[33] ELITE. Laser Solution Provider. "Ways To Collimate A Laser Beam". Disponível em: < <https://www.s-laser.com/info/ways-to-collimate-a-laser-beam-50563294.html> >. Acesso em: outubro de 2023.

[34] LÜDKE, Everton; "Um espectrofotômetro de baixo custo para laboratórios de ensino: aplicações no ensino da absorção eletrônica e emissão de fluorescência". Revista Brasileira de Ensino de Física, 2010. Disponível em: scielo.br/j/rbef/a/FnjKhFY8wykdhb8zStNwPRK/ ; Acesso em: dezembro de 2023.

[35] AZEVEDO, Aissa L.; SOUZA, Anderson K. S; CASTRO, Tiago J; "Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio". Revista Brasileira de Ensino de Física, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0349> ; Acesso em: dezembro de 2023.

[36] PAVONII, J.F; NEVES-JUNIOR, W.F.P.; SPIROPULOS, M.A; ARAÚJO, D.B. de. "Uma montagem experimental para a medida de fluorescência". Revista Brasileira de Ensino de Física, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000400018> ; Acesso em: dezembro de 2023.

[37] TINKERCAD. Projetos 3D. Disponível em: <https://www.tinkercad.com/things/aZEzaTIVQg9> . Acesso em: outubro de 2023.

[38] PIMENTEL, J. R. SAAD, F. D. YAMAMURA, P. FURUKAWA, C. H. ZUMPANO, V. H; "Uma sugestão para a Interação Multidisciplinar: A Observação do Fenômeno da Fluorescência." Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n2p365> ; Acesso em: dezembro de 2023.

[39] SILVA, Gustavo Almeida e; "Fluorescência: uma abordagem para o ensino de física moderna e contemporânea no ensino médio". Ponta Grossa, PR: Atena, 2020. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/fluorescencia-uma-abordagem-para-o-ensino-de-fisica-moderna-e-contemporanea-no-ensino-medio> ; Acesso em: dezembro de 2023.

[40] INEP (Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira). Provas e Gabaritos do ENEM 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/avaliacao-e-exames-educacionais/enem/provas-e-gabaritos/2023> ; Acesso em: dezembro de 2023.

[41] SCHUBERT, E. Fred. "Light-Emitting Diodes". Second Edition. 2006. Cambridge University Press.

[42] WORDART. Disponível em: <https://wordart.com/create> ; Acesso em out. de 2023.

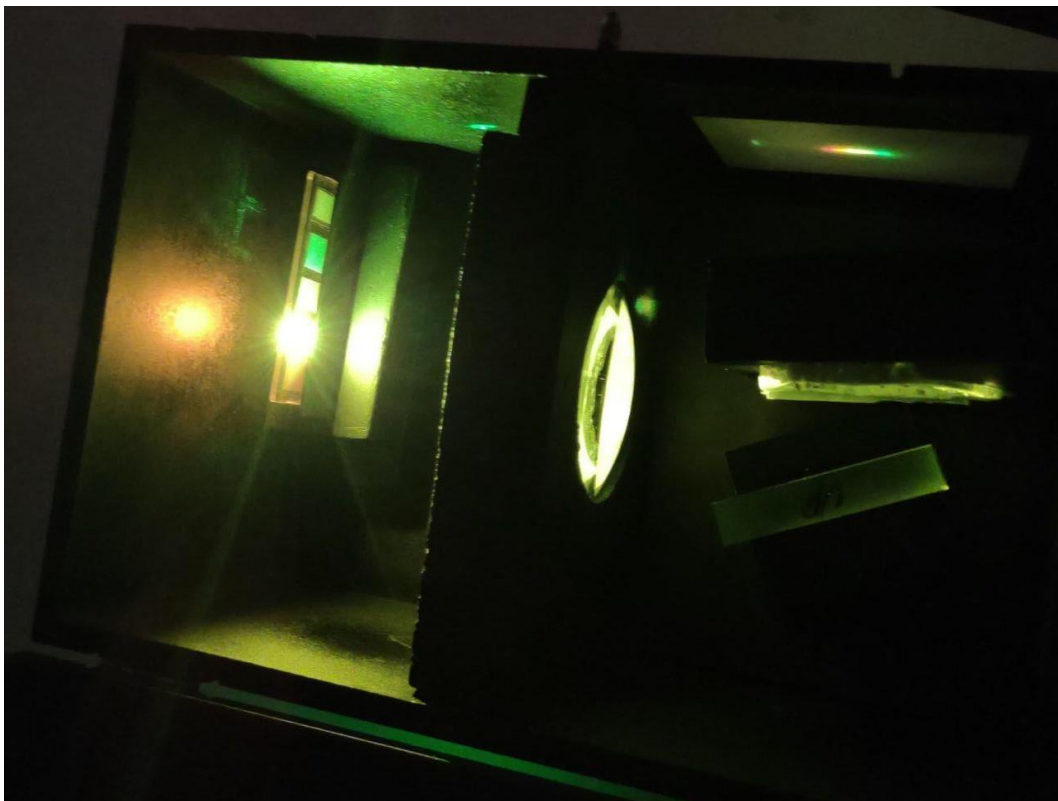
[43] GOOGLE FORMS. Disponível em: <https://workspace.google.com/intl/en/lp/forms/>; Acesso em: outubro de 2023.

[44] PIMENTEL, R.F. "Uma abordagem didática alternativa ao ensino conceitual da dualidade onda-partícula no ensino médio". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2022. Disponível em: <https://rafaelpimentel1.wixsite.com/website/> ; Acesso em: novembro de 2023.

APÉNDICE

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO
PARA ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA NO CONTEXTO DO ENSINO MÉDIO**

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL



CLEISON ADRIANO DE LIMA

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO
PARA ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA NO CONTEXTO DO ENSINO MÉDIO**

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL

Produto educacional apresentado à Universidade Federal de Viçosa e a Sociedade Brasileira de Física como parte das exigências do Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

Orientadora: Andreza Germana da Silva Subtil

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

SUMÁRIO

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL	126
A.1. CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO	127
A.1.1. Materiais Utilizados	127
A.1.2. Aparato experimental e procedimentos	133
A.2. SEQUÊNCIA DIDÁTICA	140
A.2.1 – Sugestões para aula teórica	142
A.2.2 – Sugestões para aula experimental	146
A.3. QUESTIONÁRIOS DIAGNÓSTICOS	151
APÊNDICE B - SUGESTÃO DE QUESTÕES DE VESTIBULARES	157
APÊNDICE C - PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS	165

APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL

Prezado(a) leitor(a), esse produto educacional, produzido como parte das exigências do Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, é dividido em duas sessões, sendo a primeira voltada para a metodologia da construção do espectrômetro com materiais de baixo custo e a segunda para a metodologia da preparação da sequência didática.

Na seção sobre a construção do espectrômetro, forneceremos uma lista com detalhes dos materiais utilizados, um passo a passo para a montagem do aparato e dicas para sua melhor utilização. Quanto à sequência didática, será disponibilizado uma apresentação de *slides* elaborada, os questionários diagnósticos pré-teste e pós-testes, além de orientações para a utilização desse material em sala de aula. Recomendamos a aplicação da sequência didática ao longo de duas aulas. A primeira aula dedicada à parte teórica da interação da luz com a matéria, enquanto a segunda dedicada a parte experimental, incluindo experimentos sobre luminescência e a apresentação do espectrômetro construído.

Este produto educacional foi concebido com base na premissa de Ausubel, que enfatiza a importância de o material de aprendizagem ser potencialmente significativo e relacionável à estrutura cognitiva do aluno. Adicionalmente, conforme Ausubel destaca, a recepção de um novo conhecimento, por exemplo, em forma de um experimento, requer muita atividade cognitiva para relacionar, interativamente, os novos conhecimentos com aqueles já existentes na estrutura cognitiva, envolvendo processos de captação de significados e ancoragem. Essa abordagem está alinhada à Teoria dos Construtos Pessoais de George Kelly, que salienta, em seu corolário da experiência, que o aprendizado ocorre por meio de ciclos de experiência.

Finalmente, o propósito ao término da sequência didática é sistematizar e consolidar as novas informações junto aos subsunçores (conhecimentos prévios) preexistentes, tornando os conhecimentos mais estáveis na estrutura cognitiva do aluno, conforme a dinâmica da aprendizagem significativa proposta por Ausubel. Todo o material está disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

A.1. CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO

Dispositivos comerciais destinados à espectroscopia costumam ser dispendiosos e, muitas vezes, de difícil acesso para o ensino médio. Considerando esse contexto e visando incorporar a prática experimental ao ambiente da sala de aula, nessa seção indicaremos os passos para a construção de um espectrômetro com materiais de baixo custo. A intenção é estimular, por meio do aparato construído, o interesse dos estudantes quanto a experimentação e em áreas como óptica e interação da luz com a matéria.

A.1.1. Materiais Utilizados

Nessa seção descreveremos detalhadamente os materiais necessários para a construção de um espectrômetro de baixo custo e fácil de ser manipulado durante uma aula experimental. A Tabela A.1.1 traz uma lista dos materiais utilizados para construção do espectrômetro e seus preços aproximados.

Tabela A.1.1 - Lista dos materiais utilizados para construção do espectrômetro. Cotação realizada no segundo semestre de 2023. *Material encontrado em sobras de marcenaria/obras. **Geralmente encontrado em compras internacionais. ***Geralmente compra em pacotes com várias unidades.

MATERIAIS	VALOR COMERCIAL APROXIMADO EM REAIS (Analisado em compras <i>on-line</i>)
1. Papel de nota em várias cores;	R\$ 4,00 – 32,00
2. Lâmina de acrílico transparente;	R\$ 5,00 – 12,00
3. Pedaco de suporte de canaleta para banners;	R\$ 1,00 – 6,00
4. Caneta <i>laser</i> monocromático verde (532 nm);	R\$ 11,00 – 37,00
5. Caneta <i>laser</i> monocromático violeta (402 nm);	R\$ 11,00 – 37,00
6. Suporte feito de madeira para as lentes;	R\$ 0,00 *
7. Isopor para apoio das lentes;	R\$ 2,00 - 8,00
8. Lente convergente de distância focal 60 mm;	R\$ 45,00– 60,00 **
9. Lente convergente de distância focal 40 mm;	R\$ 45,00– 60,00 **
10. Rede de Difração por reflexão para fins didáticos	R\$ 207,00 – 800,00 **
11. Rede de Difração por transmissão	R\$ 70,00 – 95,00 **
12. Caixa baú de madeira em MDF;	R\$ 24,00 – 52,00
13. Papel vegetal.	R\$ 11,00 – 31,00 ***
14. Manta magnética adesiva.	R\$ 15,00 – 49,00 ***

Fonte: Próprio Autor.

Os materiais selecionados para a montagem do espectrômetro foram escolhidos considerando sua disponibilidade, sendo que todos podem ser facilmente

adquiridos em lojas especializadas ou *on-line*, com preços variados. Para os valores mais baixos dos materiais, o valor total para a construção do espectrômetro fica em média 451,00 reais para rede de difração por reflexão e 314,00 reais para rede de difração por transmissão. Vale destacar que os preços dos materiais podem variar de região para região, e não foram incluídos valores de frete nem a mão de obra caso precise de um marceneiro. Além disso, muitos dos materiais podem ser adaptados à realidade do professor e esse valor pode ser bem menor. O preço nem se compara aos valores de um espectrômetro comercial que, dependendo de sua aplicação, fica na faixa de centenas de milhares de reais. Essa lista é baseada no espectrômetro construído para o presente trabalho, os quais são explicados com mais detalhes a seguir.

Na Figura A.1.1, são exibidos os papéis tipo *post-it* em diversas cores. A escolha recaiu sobre eles devido à presença de corantes fluorescentes e à facilidade de aquisição. Normalmente, este item pode ser encontrado no material de trabalho escolar do próprio professor ou mesmo de algum aluno da turma. Dado que apenas alguns pedaços de cores diferentes são necessários, este é o item mais econômico em nossa lista de materiais.

Figura A1.1 - Papel de nota em várias cores;



Fonte: Próprio Autor.

A Figura A.1.2 exibe uma lâmina transparente de acrílico destinada a receber as amostras de papel de nota. Essa lâmina é inserida em um suporte de canaleta para banners, assegurando sua posição apropriada. A canaleta, por sua vez, é fixada em uma base de madeira, garantido que as amostras estejam na altura do centro das lentes e também para a estabilidade do conjunto.

Figura A.1.2 -Lâmina de acrílico transparente com as amostras de papel fixadas. A lâmina é montada em um suporte de canaleta para banners presa a uma base de madeira.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura A.1.3, encontram-se os *lasers* destinados a excitar as amostras de papel de nota. Optamos por uma caneta *laser* monocromática verde (532 nm) e uma caneta *laser* monocromática violeta (402 nm). A caneta *laser* verde destaca-se pela sua potência (5000 mW), proporcionando um espectro de emissão visível mesmo em ambientes mais claros. No entanto, o espectro gerado está restrito a comprimentos de onda superiores ao verde. Por outro lado, o *laser* violeta oferece a vantagem de gerar um espectro de emissão em toda a faixa do espectro visível. Entretanto, devido à sua baixa potência (5mW), é recomendado um ambiente mais escuro para uma melhor visualização do espectro de emissão.

Figura A.1.3 - Caneta *laser* monocromática verde (532 nm) e monocromático violeta (402 nm);



Fonte: Próprio Autor.

A Figura A.1.4 apresenta as duas lentes empregadas no espectrômetro, sendo a primeira uma lente convergente com distância focal de 60 mm, enquanto a segunda é uma lente convergente com distância focal de 40 mm. A primeira lente apresenta um maior diâmetro (55 mm) e desempenha o papel de colimadora, cuja função é tornar paralelas as trajetórias dos feixes luminosos provenientes das amostras. A segunda lente, de menor diâmetro (46 mm), é utilizada para focalizar as diversas cores geradas pela rede de difração no anteparo, permitindo a visualização do espectro de emissão. Vale destacar que algumas ferramentas eletrônicas, como *Data-shows* e retroprojetores, utilizam essas lentes. Portanto, em casos de dispositivos quebrados e não utilizados, é possível retirá-las e utilizá-las no projeto, diminuindo o custo da produção. Lupas também representam uma alternativa viável. É importante lembrar que o projeto deve ser adaptado para as distâncias focais das lentes utilizadas.

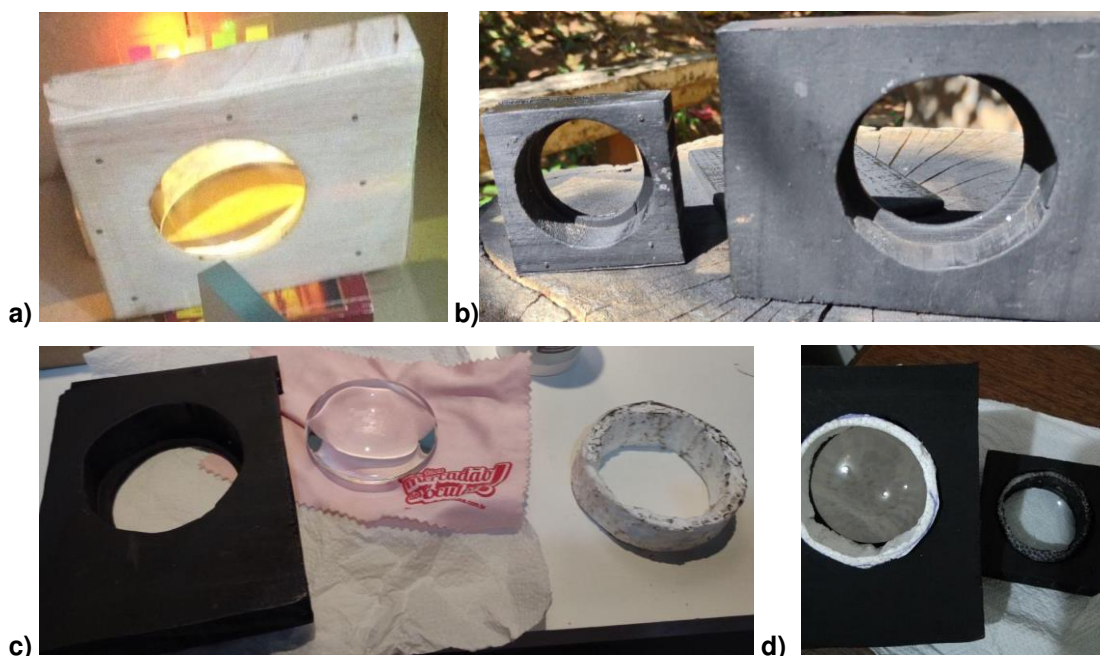
Figura A.1.4 - Lentes convergentes de distância focal de 60 mm e 40 mm, respectivamente.



Fonte: Próprio Autor.

O suporte de madeira designado para sustentar as lentes é visualizado na Figura A.1.5. Um orifício foi cuidadosamente criado com um diâmetro ligeiramente maior que o da lente, enquanto uma pequena tampa de madeira recebeu um furo com um diâmetro um pouco menor que o da lente, proporcionando um suporte adequado. Esses furos podem ser feitos com auxílio de uma broca do tipo serra copo. A lente é fixada no suporte utilizando um pedaço de isopor recortado e ajustado de maneira precisa no orifício do suporte.

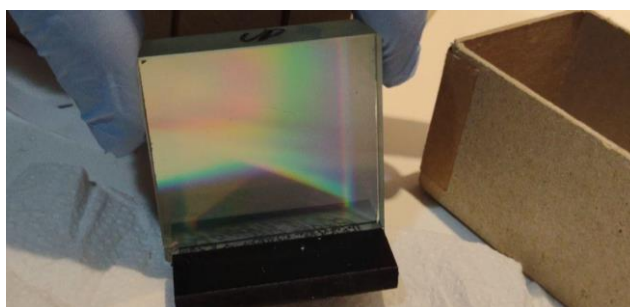
Figura A.1.5 - **a)** Suportes feitos de madeira com a lente montada em um teste inicial. **b)** Suportes pintados de preto fosco, detalhe para a tampa de madeira furada para acomodação da lente. **c)** Suporte, lente convergente e isopor recortado no molde do suporte. **d)** Lente montada e fixada pelo isopor no suporte de madeira.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura A.1.6 exibe a rede de difração, cuja função nos espectrômetros é separar espacialmente os diversos comprimentos de onda presentes em um feixe luminoso. A opção por utilizar a rede de difração por reflexão neste projeto foi motivada pela sua elevada resolução (1200 linhas/mm) e pela sua disponibilidade no almoxarifado do departamento de física da universidade. Um pequeno pedaço de madeira foi recortado de forma a encaixar a grade de difração garantido sua estabilidade. Alternativas que envolvem o uso de redes de difração por transmissão, geralmente mais econômicas, serão abordadas na próxima seção.

Figura A.1.6 - Rede de Difração por reflexão (1200 linhas/mm)



Fonte: Próprio Autor.

A Figura A.1.7 exibe a caixa de madeira em MDF destinada a acomodar os componentes do espectrômetro. A vantagem dessa caixa reside na capacidade de isolar o experimento da luz ambiente externa quando fechada. Adicionalmente, tanto a caixa, quanto os demais componentes de madeira, podem ser pintados de preto fosco, minimizando possíveis reflexões indesejadas. Essa caixa é facilmente encontrada em lojas *on-line* especializadas, disponível em diversas dimensões. As dimensões da caixa utilizada neste trabalho são 17cm x 12cm de base e 13cm de altura. Essas dimensões são suficientes para atender as distâncias focais das lentes empregadas.

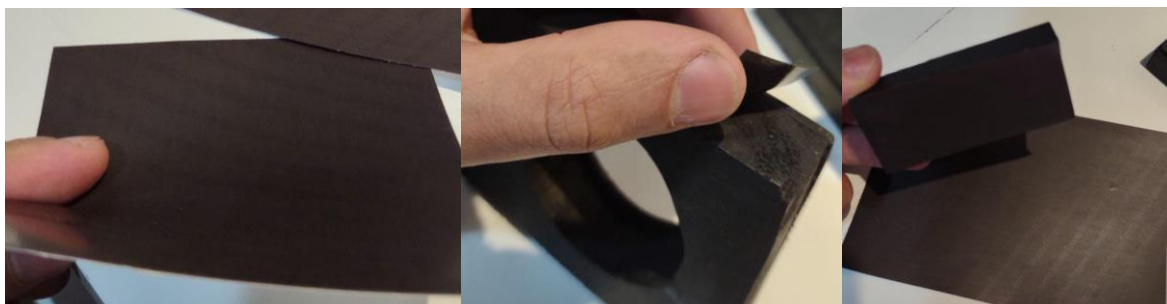
Figura A.1.7 - Caixa baú de madeira em MDF com recorte feito para o anteparo de papel vegetal.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura A.1.8 apresenta-se as mantas magnéticas adesivas que foram colocadas tanto no fundo da caixa, quanto nos suportes das lentes, das amostras e da rede de difração. Dessa forma, ao observar a polaridade das mantas magnéticas e assegurar a atração entre suas faces, é possível fixar os componentes nas posições focais das lentes, garantindo assim a estabilidade e bom funcionamento dos elementos no espectrômetro.

Figura A.1.8 - Mantas magnéticas utilizadas para fixação dos componentes do espectrômetro.

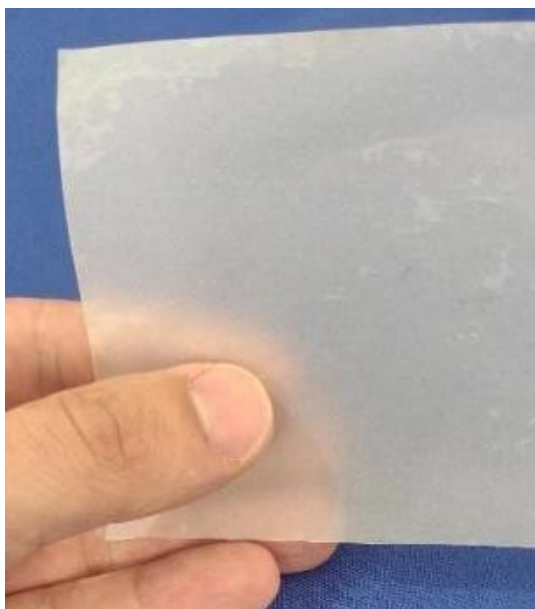


Fonte: Próprio Autor.

Esse componente é facilmente encontrado em lojas *on-line* especializadas e papelarias, além de ser comumente utilizado na fabricação de ímãs de geladeira ou utilizado em lousas brancas magnéticas, para fixação de materiais pelo professor durante alguma aula.

Finalmente, emprega-se papel vegetal, Figura A.1.9, como anteparo para a visualização do espectro de emissão das amostras. Esse tipo de papel é frequentemente utilizado para desenhos, traçados e esboços de caligrafia, sendo comumente disponível no almoxarifado escolar, especialmente para aulas do componente curricular Arte.

Figura A.1.9 - Papel vegetal utilizado como anteparo para visualização do espectro de fluorescência.



Fonte: Próprio Autor.

A.1.2. Aparato experimental e procedimentos

Os seguintes passos explicam como foi montado o espectrômetro. As amostras de papel são cortadas em pequenos pedaços e pregadas com fita adesiva transparente na lâmina transparente de acrílico. A lâmina foi colocada em um suporte, feito com um pedaço de tubo de plástico para banners, posicionado em uma base de madeira como ilustra a Figura A1.10.

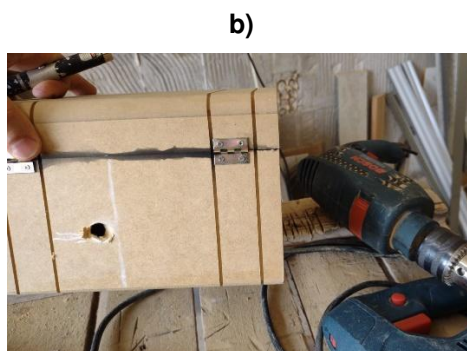
Figura A.1.10 – Amostras de papel de nota de várias cores/corantes fixadas na placa de plástico e posicionada no suporte. Da esquerda para a direita, enumeramos as amostras respectivamente como amostra 1, 2, 3, 4, e 5.



Fonte: Próprio Autor.

A caixa baú de madeira em MDF e os suportes de madeira foram pintados de preto fosco para evitar possíveis reflexões indesejadas e, após fechada, evitar a influência da luz ambiente externa. Foi feito um furo na lateral da caixa, para que o feixe *laser* pudesse incidir diretamente nas amostras, e um recorte quadrado onde posteriormente foi fixado com fita adesiva o anteparo de papel vegetal. O furo e o recorte foram feitos em uma marcenaria com auxílio de uma furadeira e máquina serra tico-tico. Esses passos são ilustrados na sequência da a Figura A.1.11.

Figura A.1.11 - Montagem da caixa baú de madeira em MDF. Nas imagens: **a)** Destaque para a pintura interna da caixa na cor de preto fosco. **b)** Detalhe do furo feito na lateral da caixa. **c)** Realização do recorte quadrado. **d)** Detalhe do papel vegetal colocado.





Fonte: Próprio Autor.

Os suportes das lentes foram alinhados com bases de madeira garantindo que as amostras estejam na altura do centro das lentes. Esse alinhamento pode ser visto na imagem da Figura A.1.12. O alinhamento desses componentes é de suma importância, ou seja, as amostras e a grade de difração devem estar alinhadas coincidindo com a altura do centro das duas lentes, para uma maior qualidade da imagem no papel vegetal. Além disso, o *laser* deve ser posicionado na altura adequada, de modo a incidir diretamente na amostra que se deseja analisar. Essa amostra deve estar exatamente alinhada com o centro da lente colimadora.

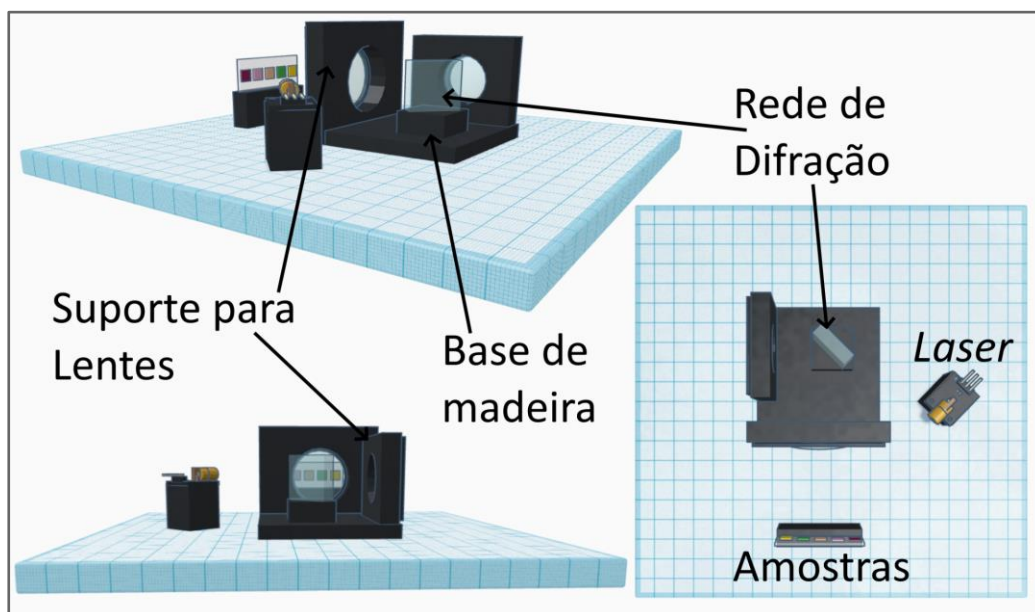
No modelo 3D da Figura A.1.13 foram destacados os componentes internos do espectrômetro com o intuito de observar suas posições e alinhamentos.

Figura A.1.12 - Amostras e suportes das lentes alinhados.



Fonte: Próprio Autor.

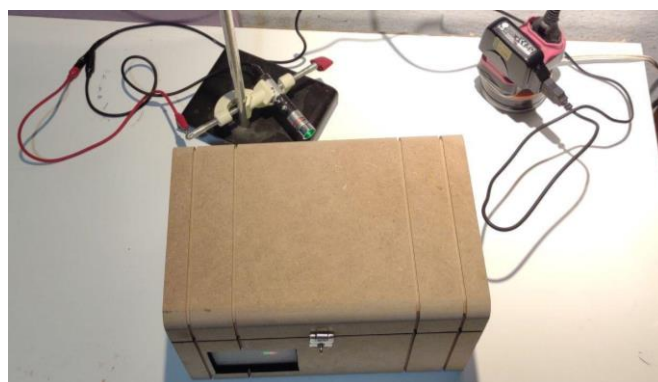
Figura A.1.13 - Esquema em 3D do aparato experimental do espectrômetro construído com destaque para imagens em perspectiva e vista superior dos componentes internos do espectrômetro.



Fonte: *Print screen* editado do modelo 3D construído pelo autor no *Software Tinkercad*.

O *laser* monocromático verde e/ou violeta é posicionado externamente ao aparato, fazendo um ângulo de incidência de 45° , minimizando a reflexão projetada nas lentes. O *laser* é utilizado para excitar as amostras de papel de nota. Para economia de pilhas e melhor desempenho, o *laser*, posicionado em um suporte externo à caixa, é ligado a um carregador de celular adaptado de modo a fornecer os 3,5 volts necessários para o seu bom funcionamento, como ilustra a Figura A.1.14.

Figura A.1.14 - Caneta *laser* montada externamente ao espectrômetro.

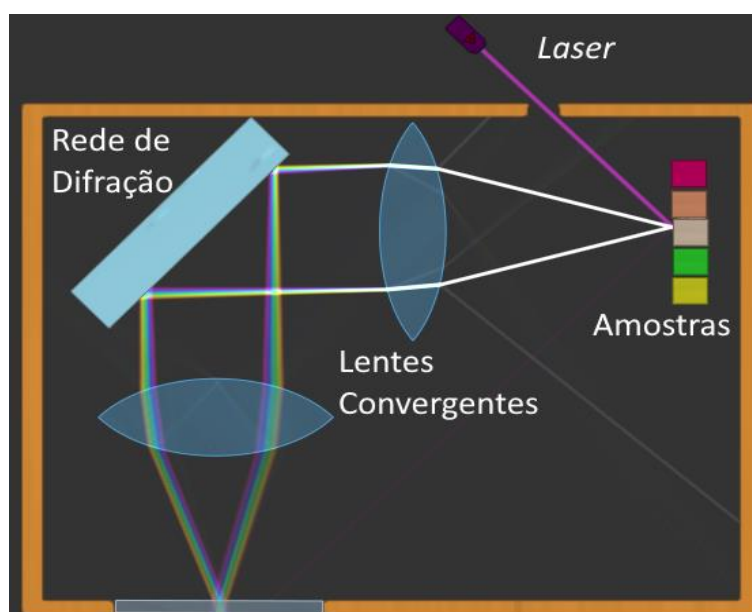


Fonte: Próprio Autor.

A região da amostra iluminada pelo *laser* está no foco de uma lente convergente que colima a luz advinda da amostra e a entrega para uma rede de

difração. A rede de difração é o elemento dispersivo do nosso espectrômetro e separa espacialmente os diferentes comprimentos de onda presentes no feixe luminoso advindo da amostra. A segunda lente é utilizada para focalizar as diferentes cores advindas da rede de difração em uma tela de papel vegetal. Essa esquematização é ilustrada na Figura A.1.15.

Figura A.1.15 - Esquema de funcionamento do aparato experimental do espectrômetro construído. A região da amostra iluminada pelo *laser* está no foco de uma lente convergente que colima a luz advinda da amostra e a entrega para uma rede de difração. Uma segunda lente é utilizada para focalizar as diferentes cores advindas da rede de difração em uma tela de papel vegetal.



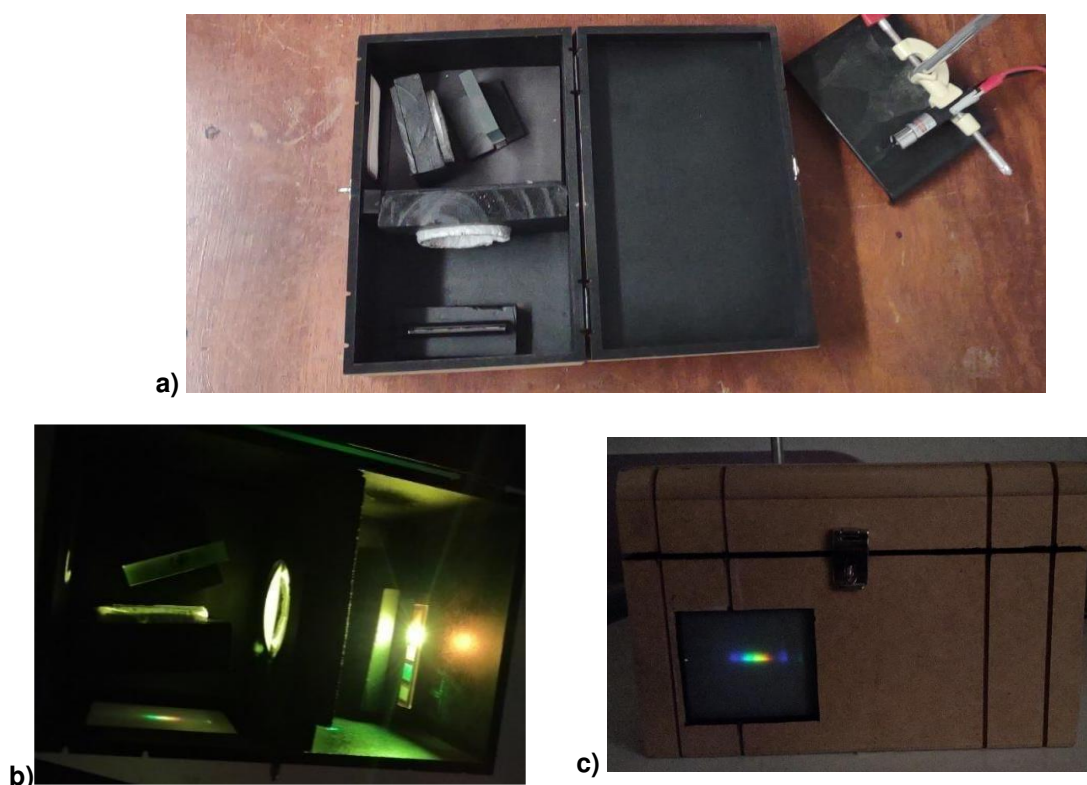
Fonte: *Print screen* de experimento virtual construído pelo autor no *Software Algodoo*.

Vale ressaltar que experimentos que utilizam *laser* podem causar problemas sérios de visão, caso seja usado da forma errada. Esse risco acontece quando o *laser* é aplicado próximo ao globo ocular, sem proteção. Desta forma é aconselhável usar óculos de proteção adequados nas fases de testes e de alinhamento do espectrômetro, e não olhar diretamente para o feixe *laser* e para a reflexão e/ou emissão das amostras estudadas. Quanto à observação do espectro de fluorescência no anteparo de papel vegetal não se detectou riscos.

A sequência de fotos da Figura A.1.16 ilustra o aparato montado. Observe o posicionamento da caneta *laser*, das amostras, lentes e da grade de difração. As mantas magnéticas adesivas foram colocadas no fundo da caixa e nos suportes das lentes, das amostras e da rede de difração, garantido a fixação dos componentes nas

posições focais das lentes. Finalmente observe o funcionamento do espectrômetro. Devido ao fenômeno da fluorescência, parte da luz emitida pela amostra apresenta cores distintas da do *laser* utilizado para excitação, como observa-se no espectro de emissão visualizado no anteparo de papel vegetal.

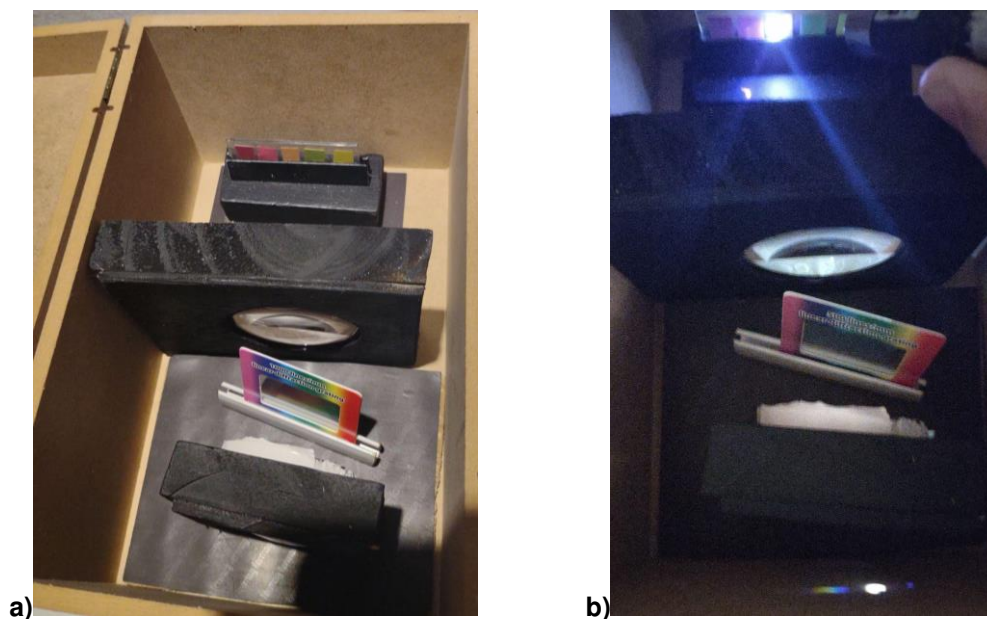
Figura A.1.16 - Montagem do espectrômetro para verificação da fluorescência. Nas imagens temos: **a)** O posicionamento da caneta *laser*, das amostras, lentes e da grade de difração. **b)** O funcionamento do espectrômetro para o *laser* verde. **c)** Parte externa do espectrômetro com destaque especial para o espectro gerado no anteparo de papel vegetal por uma das amostras excitada com o *laser* violeta.



Fonte: Próprio Autor.

Alternativas que envolvem o uso de redes de difração por transmissão, geralmente mais econômicas, também podem ser utilizadas. O princípio de funcionamento é o mesmo, bastando configurar os componentes do espectrômetro e o anteparo para o caso da transmissão. A sequência de fotos da Figura A.1.17 ilustra testes para essa configuração do aparato. Algumas dessas redes são menos dispendiosas em comparação com a rede de difração por reflexão, porém a qualidade do espectro gerado é menor e a separação espacial dos comprimentos de onda são menos precisos. Vale destacar que quanto maior a quantidade de fendas/mm, maior a resolução da rede de difração por transmissão.

Figura A.1.17 - a) Configuração do aparato montado em um teste de uso de redes de difração por transmissão. **b)** Detalhe para o funcionamento da configuração exibindo o espectro de fluorescência.



Fonte: Próprio Autor.

A opção por utilizar a rede de difração por reflexão neste projeto, como já mencionado, foi motivada pela sua elevada resolução (1200 linhas/mm) e pela sua disponibilidade no almoxarifado do departamento de física da universidade. A qualidade dos espectros gerados e a precisão da separação dos comprimentos de onda no anteparo do espectrômetro construído foram fundamentais para a comparação com os gráficos do espectrômetro comercial. Uma rede de difração por transmissão caseira utilizando um CD gravável, do qual é retirada a película protetora também pode ser feita. Isso diminui ainda mais o preço final do espectrômetro. Vale destacar que o fato de as trilhas do CD serem curvas podem distorcer os máximos de difração do espectro. A utilização de CDs como lentes difrativas pode ser obtida no artigo disponível no seguinte endereço eletrônico: scielo.br/j/rbef/a/YM7bTkZ4MNHzdftJyzM6d9G/?format=pdf.

A.2. SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Nessa seção discutiremos a metodologia de preparação de uma sequência didática dividida em cinco momentos, conforme apresentado na Tabela A.2.1, compreendendo 5 aulas de 50 minutos. Como base teórica, a sequência foi fundamentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel que enfatiza a importância de o material de aprendizagem ser potencialmente significativo e relacionável à estrutura cognitiva do aluno. Adicionalmente, a divisão da sequência didática foi pensada de forma a atender o Ciclo de Experiência Kellyana composto de cinco fases: Antecipação; Investimento; Encontro; Confirmação ou Desconfirmação e Revisão Construtiva, que apresenta caminhos de como uma pessoa constrói o conhecimento.

Tabela A.2.1 - Divisão da sequência didática.

Primeiro momento	Questionário diagnóstico	Pré-teste: Antecipação	1 aula (50 min)
Segundo momento	Aplicação da Sequência didática	Aula teórica: Investimento	1 aula (50 min)
Terceiro momento		Aula experimental: Encontro	1 aula (50 min)
Quarto momento	Questionário diagnóstico	Pós-teste: Confirmação ou Desconfirmação	1 aula (50 min)
Quinto momento	Resultados e correção dos questionários	Correção: Revisão Construtiva	1 aula (50 min)

Fonte: Próprio Autor.

Em uma proposta de sequência didática baseada no Ciclo de Experiência Kellyana, é comum realizar pré-testes e pós-testes. O pré-teste consiste na aplicação de um questionário antes da sequência didática, enquanto o pós-teste é aplicado após a conclusão da sequência, para avaliar os resultados obtidos.

No primeiro momento da sequência didática, referente à fase de Antecipação, sugere-se a aplicação do questionário diagnóstico pré-teste. Os questionários utilizados estão disponibilizados no apêndice A.3. Nesse primeiro momento, busca-se

fomentar nos alunos suas primeiras reflexões sobre a intervenção que irão participar. Adicionalmente, relacionando com a teoria de Ausubel, a construção deste questionário e suas posteriores respostas devem ser utilizadas para verificar possíveis conhecimentos prévios, ou seja, a existência de possíveis subsunçores relevantes ao conteúdo de espectroscopia e interação da luz com a matéria, presentes na abordagem da sequência didática.

O segundo momento, referente à fase do Investimento, deve ser dedicado à aula teórica da sequência didática. Nessa etapa, busca-se que o aluno invista seu esforço em obter mais informações sobre o assunto abordado, contribuindo assim para a construção de seu conhecimento. O material da aula teórica foi elaborado após a análise dos resultados do pré-teste.

No terceiro momento, referente à fase do Encontro, o aluno deve vivenciar diretamente o evento com as demonstrações experimentais e a visualização do fenômeno da fluorescência presente no espectrômetro construído. Essa fase lhe proporciona a oportunidade de refletir sobre as ideias previamente construídas nas fases de Antecipação e Investimento.

No quarto momento, referente à fase de Confirmação ou Desconfirmação, os alunos devem ser novamente convidados a responderem um questionário. Com base em suas novas respostas, os alunos são instigados a reavaliar suas concepções prévias com base no evento vivenciado, submetendo suas hipóteses a teste, podendo estas serem validadas ou contestadas. Os resultados destes questionários, relacionando com a teoria de Ausubel, são de suma importância para nossa análise futura sobre a consolidação dos conhecimentos prévios iniciais e da evolução da turma após a aplicação da sequência didática.

Por fim, o quinto momento, referente à fase de Revisão Construtiva, deve ser dedicado à correção das questões presentes nos questionários, bem como uma oportunidade de diálogo entre o professor e alunos para rever tudo o que foi vivenciado e reconsiderar as concepções iniciais, contribuindo para a formação de novos conhecimentos.

Cabe ressaltar que os momentos podem ser adaptados de acordo com a realidade do professor e do contexto escolar em que a sequência será aplicada.

Entretanto, é importante salientar que, conforme a visão de Kelly, a aprendizagem ocorre à medida que uma pessoa atravessa essas cinco fases, promovendo uma mudança em sua estrutura cognitiva a partir das experiências anteriores.

A.2.1 – Sugestões para aula teórica

A parte teórica da interação da luz com a matéria, proposta para o a segunda aula, visa sistematizar e consolidar as novas informações junto aos subsunçores preexistentes, identificados no primeiro momento, tornando os conhecimentos mais estáveis na estrutura cognitiva do aluno, conforme a dinâmica da aprendizagem significativa proposta por Ausubel. Cabe ressaltar que o presente material foi criado com base no trabalho desenvolvido na dissertação deste presente trabalho. Contudo o conteúdo dos *slides* pode ser adaptado de acordo com o que o professor julgar necessário levando em conta o próprio levantamento dos conhecimentos prévios verificados pelo professor no primeiro momento.

Para essa aula foi preparado uma apresentação de slides com objetivo de discutir o fenômeno da luminescência. Primeiramente foi apresentado uma pergunta problema seguida de uma sequência de imagens (Figura A.2.1) como pulseiras neon (*glow sticks*), miniaturas brilhantes no escuro, um vagalume, etc. A pergunta inicial "Você já viu alguns desses fenômenos? O que eles têm em comum? Como explicá-los?" tem como objetivo despertar nos alunos uma curiosidade pelo conteúdo que será apresentado e fornecer ao professor um ponto de partida para introduzir os fenômenos de luminescência e destacar o que eles têm em comum.

Para essa discussão é importante que os alunos tenham um entendimento básico sobre ondulatória. Em uma situação ideal, alunos do segundo ano do ensino médio apresentam conhecimentos prévios (subsunçores) sobre conceitos básicos de física relacionados à ondulatória, como amplitude, frequência, período e comprimento de onda. Outro ponto de partida importante seria que os alunos compreendessem a luz como ondas eletromagnéticas. Esses conhecimentos prévios são fundamentais para entender um pouco sobre o fenômeno da fluorescência, destaque neste presente trabalho, que pode ser definido como um fenômeno no qual um material absorve luz em uma determinada faixa de comprimentos de onda e, em seguida, emite luz a um

comprimento de onda maior do que o comprimento de onda da luz incidente. Em outras palavras, a energia da emissão é tipicamente menor que a da absorção.

Como nem sempre esse é o cenário encontrado, optamos por começar nossa apresentação de slides com uma breve introdução à ondulatória, a fim de revisar esses conceitos básicos, e definir o espectro visível em termos do comprimento de onda e da frequência. Esse passo é relevante, pois ao fim da sequência vamos apresentar o espectro de emissão de amostras utilizando o espectrômetro construído. Além disso, é explicitado na apresentação a relação inversa entre frequência e o comprimento de onda, ou seja, quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda e vice-versa. Juntamente a esses conceitos é explicado que a energia é diretamente proporcional à frequência, portanto, para o espectro visível, a luz violeta é mais energética e a luz vermelha é menos energética. Finalmente é definido o fenômeno da luminescência e se explica alguns exemplos clássicos de luminescência, respondendo, a pergunta inicial da apresentação.

Ao final da aula, como motivação para a aula experimental, os alunos devem ser convidados a refletir sobre uma pergunta instigadora presente no último *slide*: “Por que, ao direcionar um laser verde para diferentes cores de papel, a luz percebida parece variar?”. A intenção é fazer com que os alunos criem hipóteses para que as mesmas sejam discutidas na seguinte aula experimental.

A sequência de imagens da Figura A.2.1 exhibe a apresentação de *slides* da primeira aula da sequência didática. Essa apresentação está disponível no endereço eletrônico <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional>.

Figura A.2.1 - Apresentação de *slides* da primeira aula da sequência didática.



LUZ E CORES

- Desde a antiguidade, o entendimento sobre a natureza da luz tem sido um desafio.
- O entendimento da cor encontra suas fundações nos famosos experimentos de Isaac Newton (1643 - 1727).
- Os experimentos históricos foram realizados no *Trinity College, Cambridge*, quando Newton fez um pequeno buraco em sua sala escura para que, através dele, os raios diretos do sol pudessem brilhar e formar uma imagem do disco do sol na parede oposta da sala.

3

LUZ E CORES

- Tomando um prisma de vidro, e colocando-o perto do buraco, ele observou que a luz estava espalhada, sobre o que ele foi o primeiro a chamar de **espectro**, em uma faixa de luz colorida: **vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta**.
- Sua conclusão foi que a luz era composta por uma mistura de todas as cores do espectro.



Imagem: <https://www.nationalgeographic.pt/media/import/attachment/original/GrandePersonagem/IsaacNewton/fig.png>

4

ONDULATÓRIA

- Uma onda é uma perturbação que se propaga através do espaço, desde o ponto que é produzida.
- As ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar, já as ondas eletromagnéticas se propagam até mesmo no vácuo.
- Essa perturbação envolve a transferência de energia de um ponto para outro, sem que as partículas do meio se desloquem.
- Em outras palavras, as partículas individuais do meio vibram ou oscilam em torno de suas posições de equilíbrio, transmitindo a energia da onda adiante.

5

ONDULATÓRIA

- Em uma onda longitudinal, as partículas se movem na mesma direção da onda. Como exemplo podemos citar as ondas sonoras.
- Já em uma onda transversal, as partículas do meio se movem perpendicularmente à direção da onda. Como exemplo podemos citar as ondas eletromagnéticas.

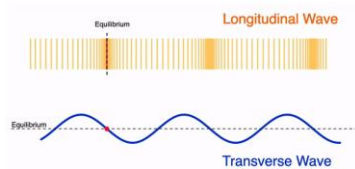


Imagem: [physicsclassroom.com/vec-content/uploads/2022/03/ImagemDaTransversalWaves.pdf](https://www.physicsclassroom.com/vec-content/uploads/2022/03/ImagemDaTransversalWaves.pdf)

6

ONDULATÓRIA

- O módulo da medida da altura máxima da crista ou o módulo da medida da profundidade máxima do vale de uma onda é chamado de **amplitude (A)**.
- A distância que uma onda percorre durante um ciclo completo de oscilação (Período) é chamado **comprimento de onda (λ)**.
- Já a **frequência** de uma onda representa o número de oscilações (ciclos) da onda que ocorrem por unidade de tempo, medida na unidade Hertz (Hz).

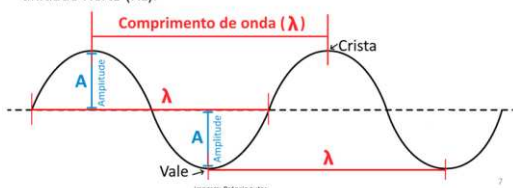


Imagem: Própria autor

7

ONDULATÓRIA

- Como a velocidade de propagação de uma onda é expressa pelo produto do comprimento de onda pela frequência

$$v = \lambda \cdot f$$

- Chegamos que a relação entre a frequência e o comprimento de onda é **inversamente proporcional**, ou seja, **quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda e vice-versa**.

$$\frac{1}{\lambda} \cdot (v) = f$$

- Para a onda eletromagnética a velocidade de propagação e a própria velocidade da luz:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

8

ONDULATÓRIA

- Várias áreas de pesquisa, tecnologias ou arte que dependem do entendimento da ondulatória.
- Ondas sonoras, por exemplo, estão presentes nas músicas que ouvimos e até mesmo em sonares que mapeiam os oceanos.
- Ondas eletromagnéticas estão presentes na telecomunicação, através das ondas de rádio, e até no *wi-fi* que usamos diariamente, na faixa das microondas.
- Ondas eletromagnéticas também estão presentes nos diagnósticos clínicos através de raios-X e raios gama na medicina.
- Até mesmo na astronomia podemos identificar várias características de estrelas e planetas analisando a luz que chega até nossos telescópios através de análises ópticas.

9

ESPECTRO VISÍVEL

- Em uma análise clássica a luz é entendida com uma onda eletromagnética. O espectro visível é a parte do espectro de radiação eletromagnética que pode sensibilizar o olho humano.
- A prática mais comum para identificar diferentes partes do espectro é por meio do comprimento de onda, sendo um guia, pois cada cor se funde gradualmente na próxima, de forma que não há um exato limite.
- Em termos do comprimento de onda essa faixa de radiação se estende aproximadamente de 380 a 750 nanômetros (10^{-9} m) do violeta ao vermelho.
- Já em termos da frequência essa faixa de radiação se estende aproximadamente de 790 a 400 Terahertz (10^{12} Hz), do violeta ao vermelho.
- Como a energia é diretamente proporcional a frequência, para o espectro visível temos que a luz violeta é mais energética e a luz vermelha menos energética.

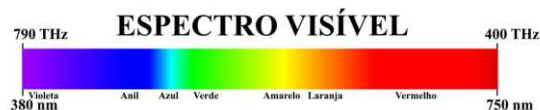


Imagem: Própria autor

10

INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA E O FENÔMENO DA LUMINESCÊNCIA

- O fenômeno da luminescência é caracterizado quando certos tipos de substâncias emitem luz ao absorver energia, sem que ocorra o aumento da temperatura.
- A luminescência é obtida sob diversas fontes de excitação e o comprimento de onda da luz emitida é característico da substância luminescente.

11

FENÔMENOS DE LUMINESCÊNCIA

Fenômeno de Luminescência	Métodos de Excitação
Bioluminescência	Energia bioquímica
Sonoluminescência	Ondas sonoras
Eletroluminescência	Campo elétrico
Quimiluminescência	Energia química
Triboluminescência	Energia mecânica
Catodoluminescência	Elétrons ou raios catódicos
Radioluminescência	Radiação nuclear ou radiação ionizante
Termoluminescência	Radiação ionizante
Fotoluminescência: Fluorescência Fosforescência	Absorção de luz (fótons)

Traduzida de: PAULI, Matthias Stephan; "Single Crystal Growth of High Melting Oxide Materials by Means of Induction Skull-Melting"; Universität Berlin; 2015

12

FENÔMENOS DE LUMINESCÊNCIA

Bioluminescência



Imagem: <https://www.emma.com.br/curiosidades/30059533a2e1c4170a000e2f8c4f4f>

Eletroluminescência



Imagem: https://it.ee.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:EL_unit-11_animation.af

Fosforescência



Imagem: <https://www.8ck.com/ingles-1186986363420074174>

fluorescência



Imagem: Próprio autor

13

FENÔMENOS DE LUMINESCÊNCIA




Imagens: <https://www.ahf.com.br/science/identificando-bronco-gommas-22-5-mr-1404>

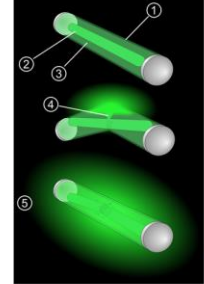
Anfíbio fluorescente:

- Diferente da bioluminescência, a fluorescência não acontece em ambientes sem luminosidade.
- As moléculas da rã absorvem luz de determinado comprimento de onda, se excitam e reemitem a luz de outra cor de menor energia, que neste caso é o verde-celeste.

14

EXEMPLOS

Quimiluminescência



Pulseiras Neon (glowstick):

1. Uma cápsula de plástico envolve o luminol e a ampola de vidro.
2. Uma ampola de vidro envolve a água oxigenada, solução de luminol e algum corante.
3. A dobra da pulseira quebra a ampola de vidro e as duas soluções reagem.
4. Durante a reação a pulseira começa a brilhar.




Imagem: https://www.vivaidea.com/wiki/Lista_Glowstick.asp

Imagem: Próprio autor

15

FOTOLUMINESCÊNCIA

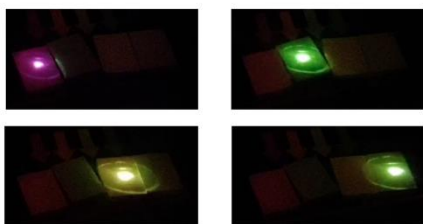
- O fenômeno da fotoluminescência é caracterizado quando certos tipos de substâncias **emitem luz ao absorver energia** na forma de radiação.
- A energia da emissão é tipicamente menor que a da absorção, sendo assim, a fluorescência normalmente ocorre em energias mais baixas ou comprimentos de onda maiores.



16

Pergunta para próxima aula:

Por que, ao direcionar um laser verde para diferentes cores de papel, a luz percebida parece variar?



17

Fonte: Próprio Autor.

A.2.2 – Sugestões para aula experimental

A segunda aula tem como ênfase a parte experimental, incluindo experimentos sobre luminescência e a apresentação do espectrômetro construído. Para essa aula foi preparado uma apresentação de *slides* com objetivo de discutir experimentos de fluorescência e fosforescência e apresentar a construção e o funcionamento do espectrômetro.

Inicialmente é revisado os conceitos de luminescência apresentados no final da primeira aula. Essa revisão é importante para que os alunos relembrem e tenham um ponto de partida para o restante da sequência. Em seguida, sugere-se a realização de experimentos de fluorescência e fosforescência como os mostrados na apresentação de slides na Figura A.2.2. Pode ser utilizado uma lâmpada luz negra, uma lâmpada que emite luz na região do ultravioleta (UV), e água tônica. Quando a radiação ultravioleta incide sobre a água tônica, essa apresenta fluorescência em um tom azulado. Outro experimento que pode ser realizado, retrata a diferença entre a fosforescência e a fluorescência. Podem ser usados papéis de nota e marca páginas de várias cores e um adesivo fosforescente em formato de lua. Todos esses objetos submetidos a radiação UV apresentam luminescência, porém quando a luz negra é apagada, ou seja, a fonte de UV é cessada, apenas o adesivo em formato de lua permanece emitindo radiação. Com essa demonstração pode-se concluir que somente o adesivo em formato de lua é constituído de uma substância fosforescente e que os outros materiais são constituídos de substâncias fluorescentes.

A demonstração da luminescência utilizando luz negra provavelmente despertará grande interesse nos alunos, e alguns deles podem trazer experiências anteriores com esse fenômeno, como por exemplo, a participação em festas iluminadas por esse tipo de luz. Sob luz negra, a fluorescência, principalmente de roupas e objetos brancos, pode ser observada.

Essas vivências vão de acordo com a teoria do Ciclo de Experiência Kellyana, de modo que os alunos, ao vivenciarem diretamente o evento com as demonstrações experimentais, terão a oportunidade de refletir sobre as ideias previamente construídas nas primeiras aulas da sequência. Cabe destacar que o professor a todo

momento deve fomentar perguntas motivadoras e promover a discussão entre os estudantes sobre suas observações e hipóteses em cada demonstração.

Com essas demonstrações pode-se retornar a pergunta instigadora da aula teórica: “Por que, ao direcionar um laser verde para diferentes cores de papel, a luz percebida parece variar?” Agora podemos afirmar que se trata da Fluorescência. Quando um laser verde incide em um papel fluorescente, parte da luz verde é absorvida pelo papel e parte é convertida em luz de comprimentos de onda maiores, emitida pelo papel. Em seguida, os alunos são convidados a se perguntarem se seria possível a construção de um instrumento para verificar o espectro de fluorescência. A resposta que pode ser explicada pelo professor é utilizando de um espectrômetro. Um espectrômetro separa uma fonte de luz de entrada em seus componentes espectrais, enquanto mede a intensidade de luz emitida por uma substância em uma ampla faixa espectral.

Em seguida é definido o que é um espectrômetro e quais são seus componentes principais. O funcionamento do espectrômetro é uma boa alternativa para introduzir ou exemplificar vários conceitos relacionados à óptica. Nos slides da Figura A.2.2 constam os princípios de funcionamento dos *lasers*, das lentes e da rede de difração, componentes essenciais do espectrômetro. Adicionalmente é comentado como se deu a construção do espectrômetro é mostrado como os componentes são montados e alinhados, de forma a gerar o espectro de emissão para as amostras de papel de notas coloridas. Um vídeo sobre a montagem é destacado na apresentação, disponível no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional/galeria>.

Após essa apresentação sugere-se que o espectrômetro seja exposto aos alunos para uma melhor visualização da montagem e a disposição dos componentes. Com o aparato experimental devidamente montado e as luzes apagadas, inicialmente utilizará o *laser* de comprimento de onda 532nm (verde) como fonte de excitação. Ressalta-se que o professor deve ter cuidado ao conduzir experimentos que utilizam *laser*, prezando pela segurança dos alunos. Os alunos devem ser solicitados a observar as cores no anteparo do espectrômetro para as cinco amostras. O mesmo procedimento será repetido com o laser de comprimento de onda 405nm (violeta) como fonte de excitação. Nesse momento, os alunos devem ser questionados sobre

a observação de cores diferentes da caneta *laser* incidente. Esse ponto pode ser muito rico, principalmente ao se depararem com o espectro de emissão do laser violeta, onde se destaca praticamente todo espectro visível no anteparo. Através das respostas dos alunos, deverá ser feita uma relação entre o “aparecimento” dessas diferentes cores no anteparo com o fenômeno da fluorescência discutido até então.

Isso vai de encontro com a pergunta instigadora inicial, pois agora, após a contemplação do espectro visual no anteparo do espectrômetro, se pode afirmar que quando um laser verde incide em um papel fluorescente, parte da luz verde é absorvida pelo papel e parte é convertida em luz de comprimentos de onda maiores, emitida pelo papel, ou seja, esse é o fenômeno da fluorescência.

Adicionalmente os alunos podem ser convidados a comparar os resultados da observação visual, que pode ser anotada em um caderno ou registrada através de fotos pelos próprios alunos, com os gráficos de fluorescência realizados no espectrômetro comercial presentes na apresentação de slides da Figura A.2.2. Essa apresentação, pode ser editada, atendendo as exigências do espectrômetro construído professor, também está disponível no endereço eletrônico <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional/>.

Figura A.2.2 - Apresentação de *slides* da segunda aula da sequência didática.

SEQUÊNCIA DIDÁTICA:

CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA NO CONTEXTO DO ENSINO MÉDIO

CLEISON ADRIANO DE LIMA
ORIENTADORA: DRA. ANDREZA GERMANA DA SILVA SUBTIL

Novembro de 2023

FOTOLUMINESCÊNCIA

- Como vimos na aula passada, o fenômeno da fotoluminescência é caracterizado quando certos tipos de substâncias **emitem luz ao absorver energia** na forma de radiação.
- A energia da emissão é tipicamente menor que a da absorção, sendo assim, a fluorescência normalmente ocorre em energias mais baixas ou comprimentos de onda maiores.

Fotoluminescência

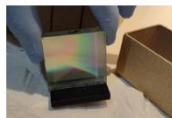
fluorescência fosforescência

Excitação é feita pela absorção de radiação.

Imagem: Próprio autor

REDE DE DIFRAÇÃO

- As redes de difração são comumente usadas em espectrômetros, várias áreas da ciência e tecnologia e em aplicações no cotidiano.
- Uma rede de difração é um dispositivo que dispersa (divide) a luz incidente em suas cores componentes.
- No cotidiano podemos citar os CDs, DVDs e discos Blu-ray para gravar e ler dados. A superfície desses materiais apresenta um conjunto de finíssimas ranhuras (linhas) onde são feitas as gravações.



11

CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO EXPERIMENTAL

Podemos observar esses componentes no espectrômetro construído. A montagem do espectrômetro é destacada no seguinte vídeo:

<https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional/galeria>



12

CONSTRUÇÃO DO ESPECTRÔMETRO EXPERIMENTAL

- Em nosso espectrômetro, a região da amostra iluminada pelo laser está no foco de uma lente convergente que colima a luz advinda da amostra e a entrega para uma rede de difração.
- A rede de difração separa espacialmente os diferentes comprimentos de onda presentes no feixe luminoso advindo da amostra.
- Uma segunda lente é utilizada para focalizar as diferentes cores advindas da rede de difração em uma tela de papel vegetal.
- Devido ao fenômeno da fluorescência, parte da luz emitida pela amostra apresenta cores distintas da do laser utilizado para excitação, como observado no anteparo de papel vegetal.

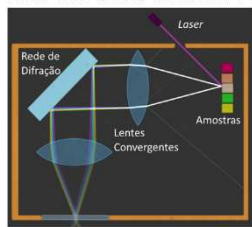


Imagem: Print screen do experimento virtual construído pelo software Algodoo

13

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

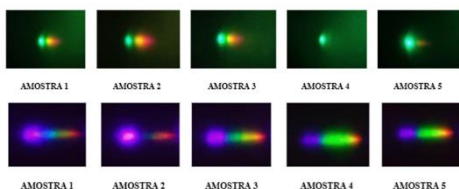
- Podemos enfim verificar a fluorescência dos diferentes papéis de nota coloridos
- Foi escolhido amostras de papel de nota de várias cores/corantes que foram fixadas na placa de plástico e posicionada em um suporte.
- Da esquerda para a direita, enumeramos as amostras respectivamente como amostra 1, 2, 3, 4, e 5.



14

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Utilizando laser de comprimento de onda 532 nm (verde) e 405 nm (violeta) como fontes de excitação, foram observadas as fluorescências das diferentes amostras/corantes via visualização das cores no anteparo do espectrômetro construído revelando que os surgimentos de novos comprimentos de onda são distintos para amostras diferentes.



15

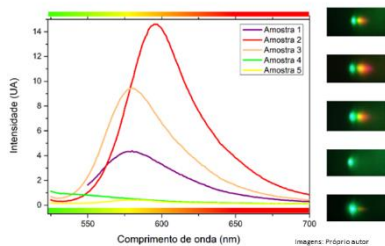
FOTOLUMINESCÊNCIA

- As cinco amostras também foram analisadas quanto a sua fluorescência em um espectrômetro comercial do laboratório de fluorescência da Universidade Federal de Viçosa – UFV
- Como o espectro da radiação emitida tem comprimentos de onda maior que a da radiação excitante, ao usar um laser violeta, esperamos ver cores do azul ao vermelho em espectro de emissão de fluorescência.
- Já para um laser verde, não podemos ver cores com comprimento de onda menor que o verde, como azul, anil e violeta por exemplo, já que a amostra deve fluorescer em menores energias que a fonte excitante. Para esse caso veríamos um espectro de emissão do verde ao vermelho.
- Os resultados para esses casos são mostrados a seguir:

16

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

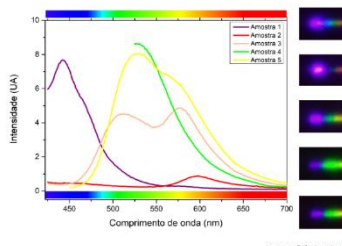
Gráfico da intensidade da fluorescência versus comprimento de onda das cinco amostras estudadas utilizando o laser de comprimento de onda de 514 nm (verde) como fonte de excitação. Ao lado a análise visual via espectrômetro construído das respectivas cinco amostras para uma fácil comparação dos resultados.



17

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Gráfico da intensidade da fluorescência versus comprimento de onda das cinco amostras estudadas utilizando o laser de comprimento de onda de 425 nm (violeta) como fonte de excitação. Ao lado a análise visual via espectrômetro construído das respectivas cinco amostras.



18

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERNARD, Valeur; BERBERAN-SANTOS, Mario N.; "A Brief History of Fluorescence and Phosphorescence before the Emergence of Quantum Theory"; Disponível em https://chemistry.as.miami.edu/_assets/pdf/murthy-group/8-history-of-luminescence-ice.pdf - Acesso em: julho 2023.
- EISBERG, R. M.; RESNICK, R.; "Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos e Partículas"; Editora Campus; Rio de Janeiro, RJ, Brasil; 1994.
- HUNT, R.W.G, POINTER, M.R. "Measuring Colour"; 1923; Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology; 4th ed.
- LAKOWICZ, Joseph R.; "Principles of Fluorescence Spectroscopy" 3ª Edition; Editora Springer; University of Maryland School of Medicine Baltimore, Maryland, USA; 2006.
- MOREIRA, Marco Antonio; "O Que É Afinal Aprendizagem Significativa?"; Instituto de Física – UFRGS – Campus Porto Alegre – RS. 2012; Disponível em: < <http://moreira.if.ufrgs.br/oqueeafinal.pdf> > Acesso em: julho 2023.
- PAUN, Matthias Stephan; "Single Crystal Growth of High Melting Oxide Materials by Means of Induction Skull-Melting"; Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Berlin. Berlin, Alemanha; 2015.
- SCHUBERT, E. Fred; Light-Emitting Diodes; Second Edition; 2006; Cambridge University Press
- YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.; "Física IV: Sears e Zemansky: ótica e física moderna"; colaborador: FORD, A. Lewis; tradução Daniel Vieira; revisão técnica Adir Moysés Luiz; 14 ed; São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

Fonte: Próprio Autor.

A.3. QUESTIONÁRIOS DIAGNÓSTICOS

Um projeto de levantamento de dados apresenta uma descrição quantitativa de tendências, atitudes ou opiniões de uma população, através de uma amostragem ^[11]. A partir dos resultados da amostra, o pesquisador generaliza ou faz afirmações sobre a população. Em um experimento, por exemplo, a intenção básica é testar o impacto de um tratamento (ou de uma intervenção) sobre um resultado, controlando fatores que possam influenciar esse resultado ^[11]. Nesse sentido, pela análise dos resultados da amostragem, pode-se inferir se a preparação do espectrômetro e sua utilização em sala de aula é uma boa alternativa para estudos de temas relacionados à interação da luz da matéria, bem como os elementos presentes nos espectrômetros, como estudo das lentes, rede de difração, etc.

É recomendado que os alunos respondam ao questionário diagnóstico pré-teste (Quadro A.3.1), para avaliar os conhecimentos prévios (possíveis subsunçores) antes da aplicação da sequência didática. O uso do formato *on-line* via *Google Formulários* facilita a coleta de dados, permitindo análises rápidas e a geração de um arquivo em planilha para análises mais detalhadas. Para as respostas objetivas, uma forma de análise de fácil visualização é a representação na forma de gráficos de setores, feitos na própria plataforma *Google Forms*. Nesse caso as respostas são apresentadas em porcentagem de cada uma das alternativas em relação ao número total de respostas dadas. Entretanto, um formulário impresso pode ser utilizado caso se adapte melhor a realidade do professor e da turma.

Por fim, após a sequência didática, é aconselhável que os alunos respondam ao questionário diagnóstico pós-teste (Quadro A.3.1). Nesse último momento,

pretende-se verificar os novos conhecimentos construídos, evidenciando as mudanças estabelecidas em relação aos conhecimentos prévios verificados no primeiro momento. É relevante salientar que os questionários pré-teste e pós-teste são idênticos, permitindo a observação da evolução da turma, embora os alunos não sejam informados sobre esse detalhe. O ideal é que esse questionário seja aplicado um tempo após a sequência didática, a fim de avaliar se a aprendizagem foi possivelmente significativa, isto é, não meramente mecânica. Segundo a teoria de Ausubel, é importante observar o tempo de obliteração. Enquanto um subsunçor não é frequentemente utilizado, ocorre essa inevitável obliteração, essa perda de discriminação entre significados, um processo normal do funcionamento cognitivo, caracterizado pelo esquecimento. Contudo, em se tratando de aprendizagem significativa, a aprendizagem é possível e relativamente rápida. Essa condição difere significativamente da aprendizagem mecânica. Se o esquecimento for total, assemelha-se ao caso em que o indivíduo nunca tivesse aprendido um certo conteúdo, sendo provável que a aprendizagem tenha sido mecânica, não significativa.

Vale ressaltar que os questionários podem ser editados, atendendo a exigência do espectrômetro construído e da realidade da turma em que será realizado o trabalho. O questionário conta com 23 questões e o tempo médio de respostas sugerido é de 20 a 30 minutos.

Quadro A.3.1 - Questionário diagnóstico. Destaque em vermelho para as alternativas corretas das questões objetivas. As respostas das questões abertas são pessoais.

QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO PRÉ-TESTE E PÓS-TESTE

1. O que você já entende sobre ondulatória? Dê exemplos que envolvam fenômenos ondulatórios em situações do cotidiano.

2. Você pode explicar o que é uma onda? Se sim, descreva com suas palavras.

3. Qual é a diferença entre uma onda transversal e uma onda longitudinal?

- a) Na onda transversal, as partículas do meio oscilam na mesma direção da onda, enquanto na onda longitudinal, as partículas oscilam perpendicularmente à direção da onda.

- b) Na onda transversal, as partículas do meio oscilam perpendicularmente à direção da onda, enquanto na onda longitudinal, as partículas oscilam na mesma direção da onda.
- c) A onda transversal envolve compressão e rarefação das partículas do meio, enquanto a onda longitudinal envolve oscilação das partículas em relação à direção da onda.
- d) As ondas transversais se propagam apenas em líquidos, enquanto as ondas longitudinais se propagam em sólidos e gases.
4. O que a frequência de uma onda representa?
- a) O número de oscilações (ciclos) da onda que ocorrem por unidade de tempo.
- b) O módulo da distância entre dois picos consecutivos da onda.
- c) O módulo da distância entre a crista (pico) e o vale de uma onda.
- d) O intervalo de tempo de uma oscilação completa.
5. O que a amplitude de uma onda representa?
- a) O módulo da distância entre dois picos consecutivos da onda.
- b) O módulo da medida da altura máxima da crista (pico) ou o módulo da medida da profundidade máxima do vale de uma onda.
- c) O número de oscilações que a onda faz por segundo.
- d) O módulo da distância entre a crista (pico) e o vale de uma onda.
6. Em uma onda, o que representa o comprimento de onda?
- a) A distância que uma onda percorre durante um ciclo completo de oscilação.
- b) O módulo da distância entre a crista (pico) e o vale de uma onda.
- c) O número de oscilações por segundo.
- d) O módulo da medida da altura máxima da crista (pico) ou o módulo da medida da profundidade máxima do vale de uma onda.
7. Qual é a relação entre a frequência e o comprimento de onda?
- a) Quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda.
- b) Quanto maior a frequência, maior o comprimento de onda.
- c) A frequência e o comprimento de onda são independentes um do outro.
- d) A frequência e o comprimento de onda são grandezas iguais.
8. Você pode mencionar exemplos de aplicações práticas das lentes no cotidiano e na tecnologia?
-
-
9. O que uma lente convergente faz com a luz paralela que a atinge?
- a) Faz com que a luz se afaste do eixo central.
- b) Faz com que a luz se concentre em um ponto após passar pela lente.
- c) Não afeta a direção da luz paralela.
10. O que uma lente divergente faz com a luz paralela que a atinge?

- a) **Faz com que a luz se afaste do eixo central.**
b) Faz com que a luz se concentre em um ponto após passar pela lente.
c) Não afeta a direção da luz paralela.
11. O que é o ponto focal em uma lente?
a) **É o ponto em que os raios de luz paralelos convergem após passarem pela lente.**
b) É o ponto onde a lente é mais espessa.
c) É o ponto onde a lente toca a superfície de um objeto.
d) É o ponto onde a lente está completamente fora de foco.
12. O que é uma rede de difração?
a) Um dispositivo que reflete completamente a luz incidente.
b) **Um dispositivo que dispersa (divide) a luz incidente em suas cores componentes.**
c) Um dispositivo que dispersa (divide) a luz incidente em várias direções.
d) Um dispositivo que bloqueia a luz incidente, criando uma sombra.
13. As redes de difração são comumente usadas em várias áreas da ciência e tecnologia e em aplicações no cotidiano. Marque a alternativa correta sobre um exemplo de aplicação da rede de difração no cotidiano:
a) em câmeras de smartphones e câmeras digitais comuns.
b) **são usadas em CDs, DVDs e discos Blu-ray para gravar e ler dados.**
c) em iluminação de ambientes.
d) em sistemas de comunicação sem fio, como telefonia celular.
14. Você pode dar exemplos de materiais ou substâncias que exibem fluorescência?

15. O que é um espectro de emissão?
a) Um espectro que mostra as cores de um arco-íris.
b) Um espectro que mostra as cores absorvidas por um material.
c) **Um espectro que mostra as cores emitidas por um material quando excitado.**
16. Qual das seguintes opções é uma aplicação típica da fluorescência?
a) **Iluminação de ambientes.**
b) Navegação por GPS.
c) Em lâmpadas incandescentes.
d) Em aparelhos de aquecimento.
17. Qual é a característica distintiva da fosforescência em relação à fluorescência?
a) A fosforescência não necessita de uma fonte de excitação.
b) **A fosforescência dura mais tempo após a excitação.**
c) A fosforescência não envolve emissão de luz.
d) A fosforescência ocorre em altas temperaturas.

18. Marque as alternativas que trazem alguns exemplos práticos de luminescência:
- Lâmpadas de luz negra para criar efeitos visuais brilhantes em festas.
 - A conversão de luz solar em energia química pelas plantas.
 - Documentos, notas de dinheiro e cartões de identificação com marcas detectadas sob luz ultravioleta.
 - Etiquetas e adesivos sinalizadores de segurança.
 - A formação de cristais a partir de soluções.
 - Pulseiras, bastões de luz, colares, e outros acessórios que proporcionam uma fonte de luz temporária.
 - A luz emitida pelos vaga-lumes.
19. O que é um espectrômetro?
- a) Um instrumento empregado para realizar medições da temperatura de objetos.
 - b) Um instrumento utilizado para se obter o espectro luminoso de amostras.
 - c) Um equipamento destinado a determinar a densidade de sólidos e líquidos, realizando medições de sua massa e volume.
 - d) Um dispositivo especializado na medição da velocidade do som, seja no ar ou em meios específicos, desempenhando um papel importante na caracterização acústica de materiais e ambientes.
20. Ao incidir um *laser* verde em um papel de nota colorido, quais cores se espera ver além da cor incidente em um espectro de emissão?
- Violeta
 - Azul Anil
 - Azul
 - Verde
 - Amarelo
 - Laranja
 - Vermelho
21. Ao incidir um *laser* violeta em um papel de nota colorido, quais cores se espera ver além da cor incidente em um espectro de emissão?
- Violeta
 - Azul Anil
 - Azul
 - Verde
 - Amarelo
 - Laranja
 - Vermelho

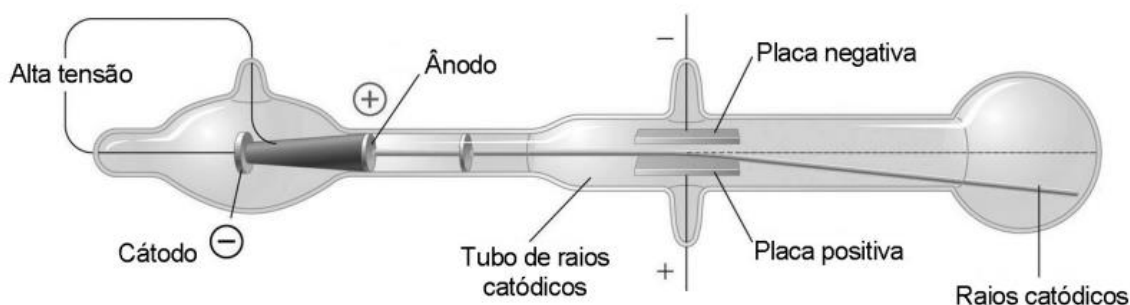
22. (Pré-teste) Você tem alguma dúvida referente às questões deste questionário diagnóstico? Algum comentário pertinente?

23. (Pós-teste) Você tem algum comentário referente a sequência didática e aos experimentos realizados?

Fonte: Próprio Autor.

APÊNDICE B - SUGESTÃO DE QUESTÕES DE VESTIBULARES

1) (ENEM 2020 - DIGITAL) No final do século XIX, muitos cientistas estavam interessados nos intrigantes fenômenos observados nas ampolas de raios catódicos, que são tubos sob vácuo em que se ligam duas placas a uma fonte de alta tensão. Os raios catódicos passam através de um orifício no ânodo e continuam o percurso até a outra extremidade do tubo, onde são detectados pela fluorescência produzida ao chocarem-se com um revestimento especial, como pode ser observado na figura. Medições da razão entre a carga e a massa dos constituintes dos raios catódicos mostram que a sua identidade independe do material do cátodo ou do gás dentro das ampolas.



CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. Química. Porto Alegre: Bookman, 2013 (adaptado).

Essa radiação invisível detectada nas ampolas é constituída por

- a) ânions.
- b) cátions.
- c) prótons.
- d) elétrons.
- e) partículas alfa.

2) (ENEM 2012) A eficiência das lâmpadas pode ser comparada utilizando a razão, considerada linear, entre a quantidade de luz produzida e o consumo. A quantidade de luz é medida pelo fluxo luminoso, cuja unidade é o lúmen (lm). O consumo está relacionado à potência elétrica da lâmpada que é medida em watt (W). Por exemplo, uma lâmpada incandescente de 40 W emite cerca de 600 lm, enquanto uma lâmpada fluorescente de 40 W emite cerca de 3 000 lm.

Disponível em: <http://tecnologia.terra.com.br>. Acesso em: 29 fev. 2012 (adaptado).

A eficiência de uma lâmpada incandescente de 40 W é

- a) maior que a de uma lâmpada fluorescente de 8 W, que produz menor quantidade de luz.
- b) maior que a de uma lâmpada fluorescente de 40 W, que produz menor quantidade de luz.
- c) menor que a de uma lâmpada fluorescente de 8 W, que produz a mesma quantidade de luz.
- d) menor que a de uma lâmpada fluorescente de 40 W, pois consome maior quantidade de energia.
- e) igual a de uma lâmpada fluorescente de 40 W, que consome a mesma quantidade de energia.

3) (ENEM 2017 libras) Uma das funções dos neutrófilos, um tipo de glóbulo branco, é fagocitar bactérias invasoras em nosso organismo. Em uma situação experimental, um cientista colocou em um mesmo meio neutrófilos e bactérias Gram positivas que apresentavam a parede celular fluorescente. Em seguida, o cientista observou os neutrófilos ao microscópio de fluorescência e verificou a presença de fluorescência em seu interior.

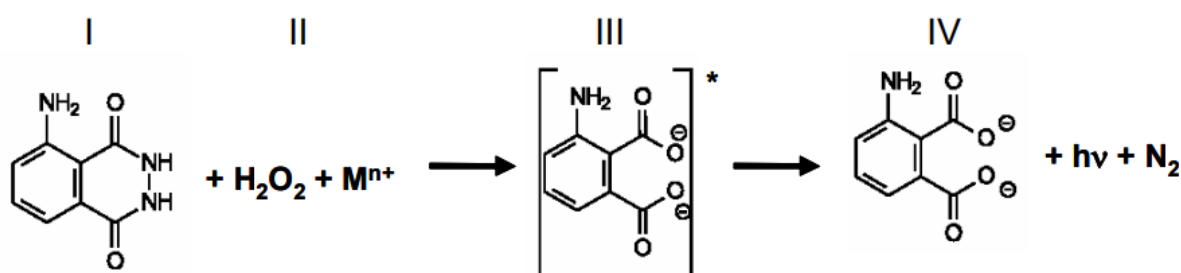
Em qual organela do neutrófilo foi percebida a fluorescência?

- a) Mitocôndria.
- b) Peroxissomo.
- c) Vacúolo digestivo.
- d) Complexo golgiense.
- e) Retículo endoplasmático liso.

4) (UFPI) O sulfeto de Zinco – ZnS – tem a propriedade denominada de fosforescência, capaz de emitir um brilho amarelo-esverdeado depois de exposto à luz. Analise as afirmativas a seguir, todas relativas ao ZnS, e indique a opção correta:

- a) salto de núcleos provoca fosforescência.
- b) salto de nêutrons provoca fosforescência.
- c) salto de elétrons provoca fosforescência.
- d) elétrons que absorvem fótons aproximam-se do núcleo.
- e) ao pagar a luz, os elétrons adquirem maior conteúdo energético.

5) (ENEM 2005) Na investigação forense, utiliza-se luminol, uma substância que reage com o ferro presente na hemoglobina do sangue, produzindo luz que permite visualizar locais contaminados com pequenas quantidades de sangue, mesmo superfícies lavadas. É proposto que, na reação do luminol (I) em meio alcalino, na presença de peróxido de hidrogênio (II) e de um metal de transição (Mn^{n+}), forma-se o composto 3-aminofталato (III) que sofre uma relaxação dando origem ao produto final da reação (IV), com liberação de energia ($h\nu$) e de gás nitrogênio (N_2).



(Adaptado. Química Nova, 25, no 6, 2002. pp. 1003-1011.)

Na reação do luminol, está ocorrendo o fenômeno de

- fluorescência, quando espécies excitadas por absorção de uma radiação eletromagnética relaxam liberando luz.
- incandescência, um processo físico de emissão de luz que transforma energia elétrica em energia luminosa.
- quimiluminescência, uma reação química que ocorre com liberação de energia eletromagnética na forma de luz.**
- fosforescência, em que átomos excitados pela radiação visível sofrem decaimento, emitindo fótons.
- fusão nuclear a frio, através de reação química de hidrólise com liberação de energia.

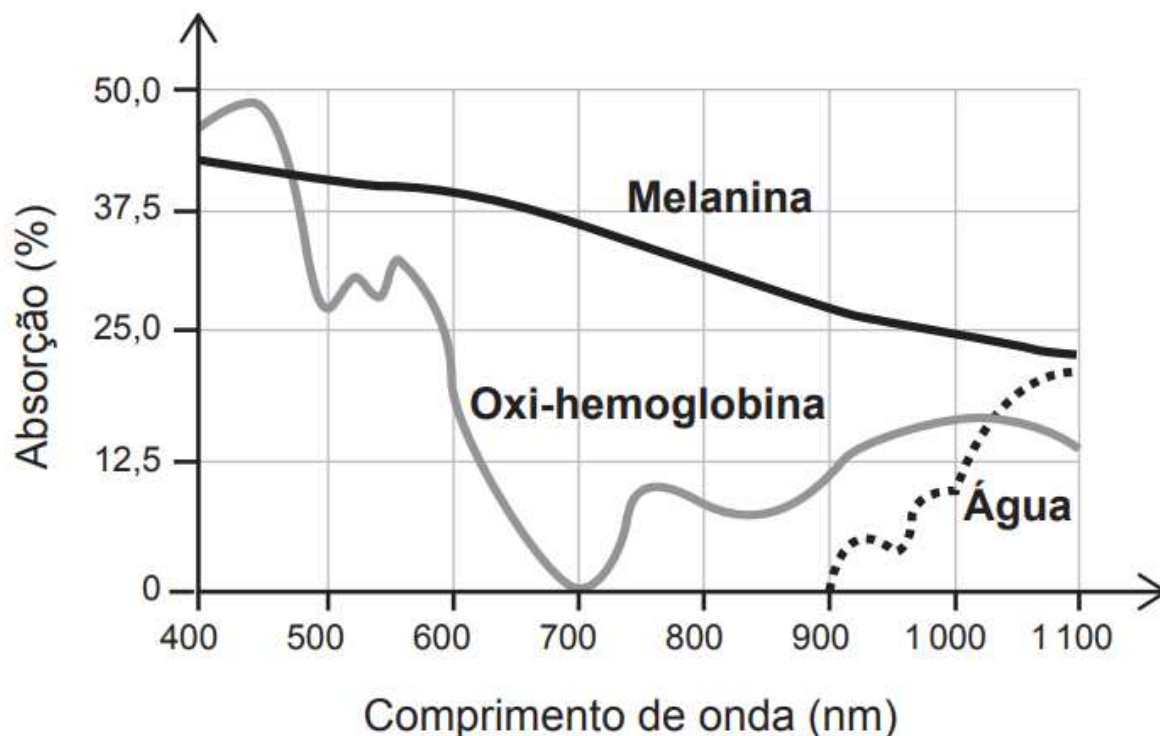
6) (ENEM 2023) Informações digitais — dados — são gravadas em discos ópticos, como CD e DVD, na forma de cavidades microscópicas. A gravação e a leitura óptica dessas informações são realizadas por um laser (fonte de luz monocromática). Quanto menores as dimensões dessas cavidades, mais dados são armazenados na mesma área do disco. O fator limitante para a leitura de dados é o espalhamento da luz pelo efeito de difração, fenômeno que ocorre quando a luz atravessa um obstáculo com dimensões da ordem de seu comprimento de onda. Essa limitação motivou o

desenvolvimento de lasers com emissão em menores comprimentos de onda, possibilitando armazenar e ler dados em cavidades cada vez menores.

Em qual região espectral se situa o comprimento de onda do laser que otimiza o armazenamento e a leitura de dados em discos de uma mesma área?

- a) Violeta.
- b) Azul.
- c) Verde.
- d) Vermelho.
- e) Infravermelho.

7) (ENEM 2017) A epilação a laser (popularmente conhecida como depilação a laser) consiste na aplicação de uma fonte de luz para aquecer e causar uma lesão localizada e controlada nos folículos capilares. Para evitar que outros tecidos sejam danificados, selecionam-se comprimentos de onda que são absorvidos pela melanina presente nos pelos, mas que não afetam a oxi-hemoglobina do sangue e a água dos tecidos da região em que o tratamento será aplicado. A figura mostra como é a absorção de diferentes comprimentos de onda pela melanina, oxi-hemoglobina e água.



MACEDO, F. S.; MONTEIRO, E. O. Epilação com *laser* e luz intensa pulsada. **Revista Brasileira de Medicina**. Disponível em: www.moreirajr.com.br. Acesso em: 4 set. 2015 (adaptado).

Qual é o comprimento de onda, em nm, ideal para a epilação a laser?

- a) 400
- b) 700**
- c) 1100
- d) 900
- e) 500

8) (ENEM 2019) Um professor percebeu que seu apontador a laser, de luz monocromática, estava com o brilho pouco intenso. Ele trocou as baterias do apontador e notou que a intensidade luminosa aumentou sem que a cor do laser se alterasse. Sabe-se que a luz é uma onda eletromagnética e apresenta propriedades como amplitude, comprimento de onda, fase, frequência e velocidade.

Dentre as propriedades de ondas citadas, aquela associada ao aumento do brilho do laser é o(a)

- a) amplitude.**
- b) frequência.
- c) fase da onda.
- d) velocidade da onda.
- e) comprimento de onda.

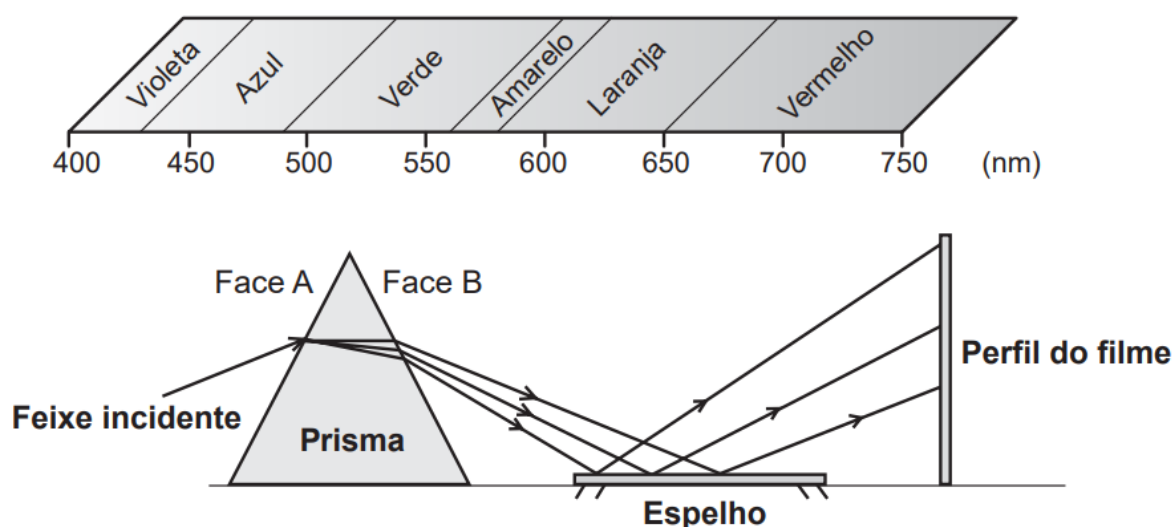
9) (ENEM 2016) Em mídias ópticas com CDs, DVDs e blue-rays, a informação é representada na forma de bits (zeros e uns) e é fisicamente gravada e lida por feixes de luz laser. Para gravar um valor "zero", o laser brilha intensamente, de modo a "queimar" (tomar opaca) uma pequena área do disco, de tamanho comparável a seu comprimento de onda. Ao longo dos anos, as empresas de tecnologia vêm conseguindo aumentar a capacidade de armazenamento de dados em cada disco: em outras palavras, a área usada para se representar um bit vem se tornando cada vez mais reduzida.

Qual alteração da onda eletromagnética que constitui o laser permite o avanço tecnológico citado no texto?

- a) A diminuição de sua energia.
- b) O aumento de sua frequência.**
- c) A diminuição de sua amplitude.
- d) O aumento de sua intensidade.

e) A diminuição de sua velocidade.

10) (ENEM 2018) A figura representa um prisma óptico, constituído de um material transparente, cujo índice de refração é crescente com a frequência da luz que sobre ele incide. Um feixe luminoso, composto por luzes vermelha, azul e verde, incide na face A, emerge na face B e, após ser refletido por um espelho. Incide num filme para fotografia colorida, revelando três pontos.



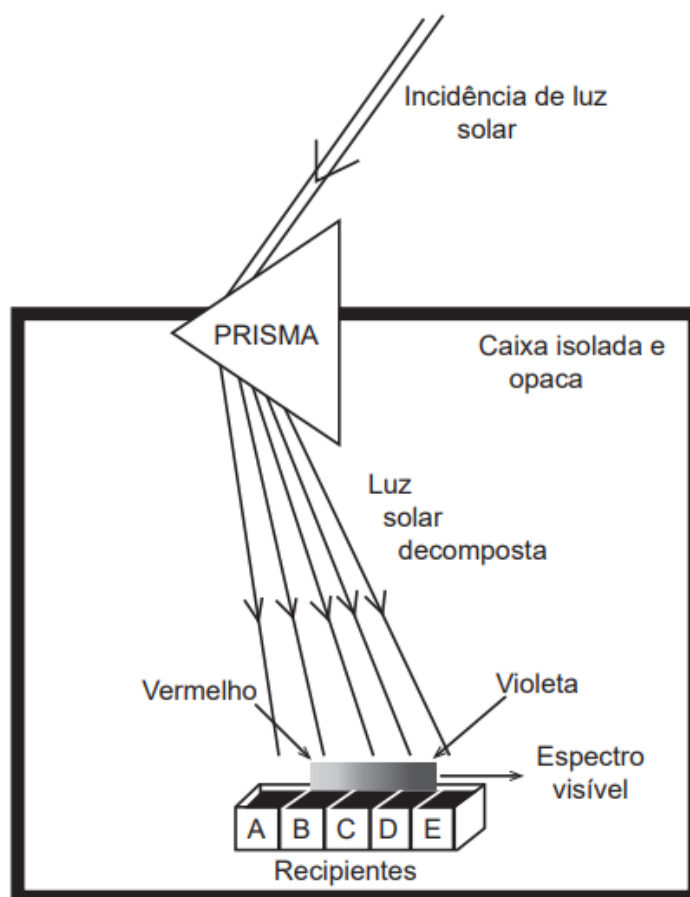
Observando os pontos luminosos revelados no filme, de baixo para cima, constatam-se as seguintes cores:

- Vermelha, verde, azul.
- Verde, vermelha, azul.
- Azul, verde, vermelha.
- Verde, azul, vermelha.
- Azul, vermelha, verde.

11) (ENEM 2020) Herschel, em 1880, começou a escrever sobre a condensação da luz solar no foco de uma lente e queria verificar de que maneira os raios coloridos contribuem para o aquecimento. Para isso, ele projetou sobre um anteparo o espectro solar obtido com um prisma, colocou termômetros nas diversas faixas de cores e verificou nos dados obtidos que um dos termômetros iluminados indicou um aumento de temperatura maior para uma determinada faixa de frequências.

SAYURI. M.; GASPAR, M. B. Disponível em: www.cienciamao.usp.br. Acesso em: 15 ago. 2016 (adaptado).

Para verificar a hipótese de Herschel, um estudante montou o dispositivo apresentado na figura. Nesse aparato, cinco recipientes contendo água, à mesma temperatura inicial, e separados por um material isolante térmico e refletor são posicionados lado a lado (A, B, C, D e E) no interior de uma caixa de material isolante térmico e opaco. A luz solar, ao entrar na caixa, atravessa o prisma e incide sobre os recipientes. O estudante aguarda até que ocorra o aumento da temperatura e a afere em cada recipiente.



Em qual dos recipientes a água terá maior temperatura ao final do experimento?

- a) A
- b) B
- c) C
- d) D
- e) E

12) Pesquisadores dos Estados Unidos desenvolveram uma nova técnica, que utiliza raios de luz infravermelha (invisíveis a olho nu) para destruir tumores. Primeiramente, o paciente recebe uma injeção com versões modificadas de anticorpos que têm a

capacidade de “grudar” apenas nas células cancerosas. Sozinhos, eles não fazem nada contra o tumor. Entretanto, esses anticorpos estão ligados a uma molécula, denominada IR700, que funcionará como uma “microbomba”, que irá destruir o câncer. Em seguida, o paciente recebe raios infravermelhos. Esses raios penetram no corpo e chegam até a molécula IR700, que é ativada e libera uma substância que ataca a célula cancerosa.

Disponível em: <http://super.abril.com.br>. Acesso em: 13 dez. 2012 (adaptado).

Com base nas etapas de desenvolvimento, o nome apropriado para a técnica descrita é:

- a) Radioterapia.
- b) Cromoterapia.
- c) Quimioterapia.
- d) Fotoimunoterapia.
- e) Terapia magnética.

APÊNDICE C - PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS

Participar de eventos acadêmicos é uma oportunidade única para compartilhar conhecimentos, pesquisas e descobertas com a comunidade acadêmica. Essas experiências não apenas contribuem para a disseminação do saber, mas também enriquecem a formação individual, promovendo a interação e o debate construtivo entre os pares. A seguir os certificados da participação do autor apresentando recortes do presente trabalho em formato de painéis no Simpósio de Integração Acadêmica – SIA, em 2022, e no V Simpósio da Pós-Graduação em Física, em 2023, ambos eventos realizados na Universidade Federal de Viçosa. Detalhes estão disponibilizados no site do produto educacional no seguinte endereço eletrônico: <https://cleisonlima.wixsite.com/produto-educacional/>.

Figura B.1.1 - Certificados da participação no Simpósio de Integração Acadêmica – SIA, em 2022.



Figura B.1.2 - Certificados da participação no V Simpósio da Pós-Graduação em Física, em 2023. O poster apresentado foi destaque como um dos melhores trabalhos apresentados no evento.

