



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO ARAGUAIA
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

ESPECTRO DE RAIAS DOS ELEMENTOS
QUÍMICOS: UMA SUGESTÃO DE APLICAÇÃO PARA O
ENSINO MÉDIO.

Franco Vinícius Delfino

Barra do Garças – MT

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO ARAGUAIA
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

ESPECTRO DE RAIAS DOS ELEMENTOS QUÍMICOS: UMA
SUGESTÃO DE APLICAÇÃO PARA O ENSINO MÉDIO.

FRANCO VINÍCIUS DELFINO

Orientador: Prof. Dr. Adellane Araújo Sousa

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física como um dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Barra do Garças - MT

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D349e Delfino, Franco Vinícius.
ESPECTRO DE RAIAS DOS ELEMENTOS QUÍMICOS: UMA SUGESTÃO DE APLICAÇÃO PARA O ENSINO MÉDIO [recurso eletrônico] / Franco Vinícius Delfino.
-- Dados eletrônicos (1 arquivo : 95 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Adellane Araújo Sousa.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física, Pontal do Araguaia, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

1. Ensino de Física. 2. Física moderna. 3. Modelos atômicos. 4. Espectroscopia.
I. Sousa, Adellane Araújo, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Espectro de Raias dos Elementos Químicos: uma Sugestão de Aplicação para o Ensino Médio

AUTOR: Franco Vinícius Delfino

Dissertação defendida e aprovada em 19 de Maio de 2023.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. PROFESSOR DOUTOR ADELLANE ARAÚJO SOUSA (Presidente da banca e orientador)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO/CUA/BARRA DO GARÇAS - MT
2. PROFESSOR DOUTOR FABRÍZIO MYAKI ALVES (Membro interno)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO/CUA/BARRA DO GARÇAS - MT
3. PROFESSOR DOUTOR ELVIS LIRA DA SILVA (Membro externo)
INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO/CUIABÁ - MT

BARRA DO GARÇAS-MT, 19 DE MAIO DE 2023.



Documento assinado eletronicamente por **ADELLANE ARAUJO SOUSA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 22/05/2023, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FABRIZIO MYAKI ALVES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 22/05/2023, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ELVIS LIRA DA SILVA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 25/05/2023, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5807106** e o código CRC **9E0A91DC**.

Referência: Processo nº 23108.038386/2022-43

SEI nº 5807106

DEDICATÓRIA

Dedico, por todo merecimento, este trabalho à minha avó, dona Leidina Ribeiro Delfino, sem a qual todo o peso dos atos violentos e hediondos, pelos quais passei, não teria sido suprimido em função de minha instrução formal. O olhar perspicaz e terno dela conduziu-me, ainda, à descoberta, e ao tratamento de uma condição rara, a “quem” também dedico este texto: a síndrome de Tourette. Esta obriga-me a provar a mim mesmo, todos os dias, que “dou conta do recado”! Com ela, e apesar dela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos amigos e colegas, Devacir Vaz de Moraes, Agnaldo Borges, e Geisa Pires, ainda no IFMT, em Confresa, por todo apoio que me ofereceram, principalmente nos tempos de intenso tratamento contra depressão. Eles se sobrecarregaram para que eu pudesse sobreviver. Muito obrigado! Jamais esquecerei!

À Gislane Maia, minha colega, amiga e parceira mineira/mato-grossense para todas as horas, por ter sido meu suporte e força, dentro e fora do ambiente de trabalho. Gisa espero vê-la por aqui e logo!

À Jéssica Rizzardo, que fora minha estudante na graduação em Física, minha orientanda e, hoje, minha colega de trabalho, e sempre amiga: Eu ainda não sei o que está acontecendo, nem entendi nada, mas sigo firme! (Hehe!) Aguardo ansiosamente por revê-la!

Ao meu amigo e fraterno irmão Vinícius Dorival de Oliveira, pela confiança em mim depositada, pelos momentos tão bons e inexplicáveis vividos até aqui, e pelo suporte oferecido quando de minha mudança de estado. Não teria sido possível sem você. Obrigado.

À minha mãe, dona Mônica Leopoldina Delfino, que sempre viu força onde eu mesmo via fraqueza e defeito. Até hoje, o único ser humano capaz de ser ajuda em momentos em que os pensamentos obsessivos me consomem a paz. Agradeço demais a senhora ter visto em mim tamanha força, e me ajudado a perceber que eu poderia ser maior que a Tourette.

À minha querida “mãe postiça”, dona Fátima Clarice, que sempre foi tão receptiva comigo, sempre boa conselheira, me dando tanta força quando estive longe, e também agora que estou mais próximo. Obrigado, dona Fátima!

À minha ex-aluna, e atual amiga do peito, Dra. Enf. Mariana Aguiar, pelos apoios conjuntos, pelos surtos igualmente conjuntos, por toda a troca de experiências e afetos gratuitos para com este ex-professor. Muitíssimo obrigado por toda a consideração!

Ao meu companheiro, sr. Marcos Paulo Alves Fleires, que, para além de toda parte de apoio pessoal e emocional, foi partícipe na construção/montagem de meu aparato experimental, descrito neste trabalho. Minha imperícia com

trabalhos manuais foi resolvida através de suas habilidades. Meus mais sinceros agradecimentos, por tudo, e por tanto, meu querido.

Ao meu amigo-irmão e colega de profissão Me. Renan Pinheiro de Oliveira, por tudo! Não sei nem por onde começar! Sobre o trabalho, posso dizer que este só começou a se desenrolar melhor depois de ter tido sua ajuda. Sobre outros temas, meu caro, não imaginas o quanto gosto de ti, e quanto sou grato! Sério.

Ao Dr. Vanuildo Silva de Carvalho, hoje professor do Instituto de Física da UFG, que, além de me dedicar amizade, também me dedicou seu tempo e paciência na ajuda com o entendimento e a matematização de fenômenos físicos, durante este curso. Muito obrigado!

Ao meu orientador, Dr. Adellane Araujo Sousa, pela prestimosidade em atender e orientar um estudante com as minhas diferenças. Seus direcionamentos foram de ordem fundamental para a construção do texto deste trabalho. Por tudo, agradeço.

À Dra. Telma Waldow de Souza, que por 7 anos foi minha terapeuta, e também um divisor de águas para o meu processo de entendimento, aceitação, e análise dos mais variados aspectos de minha personalidade, em especial ao que concerne às imposições da síndrome de Tourette. Sempre lembrada!

E, sobretudo, agradeço a mim mesmo, por, mesmo no transcorrer das mais variadas intempéries, conseguir me reencontrar, me reinventar, me reafirmar, e prosseguir firme nos meus próprios objetivos e propósitos de vida. Este sou eu!

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

RESUMO

No transcorrer de toda a práxis relativa ao ensino de Física, é perceptível o interesse dos estudantes sobre assuntos cuja temática versa sobre a Física Moderna e Contemporânea: modelos atômicos, quantização, natureza da luz, fenômenos luminosos, composição química de planetas, estrelas, cometas e afins, além de identificação de amostras de substâncias. Muitos destes fenômenos têm explicações e conceituações científicas que podem fugir ao nível em que o estudante se encontra, ou mesmo podendo os conteúdos relacionados a estes eventos/fenômenos não versarem no projeto pedagógico do curso em que se encontram inseridos. Destarte, pensando numa abordagem que possa minimamente contemplar a temática citada, num cenário de Ensino Médio, bem como esclarece ainda a BNCC de 2018, este trabalho versa sobre o efeito espectroscópico observado a partir de diferentes fontes luminosas em cuja composição/construção acrescenta-se algum elemento químico (mais especificamente o sódio e o mercúrio), de tal maneira que, através da observação do espectro de raios dos mesmos, possam ser encontrados padrões de comparação e identificação de componentes.

Palavras-chave: Ensino de Física. Física moderna. Modelos atômicos. Espectroscopia.

ABSTRACT

In the course of all the praxis related to the teaching of Physics, the students' interest in subjects whose theme deals with Modern and Contemporary Physics is perceptible: atomic models, quantization, nature of light, luminous phenomena, chemical composition of planets, stars, comets and the like, in addition to the identification of samples of substances. Many of these phenomena have scientific explanations and concepts that may differ from the student's level or even the contents related to these events/phenomena may not be part of the pedagogical project of the course in which they are inserted. Thus, thinking of an approach that can minimally contemplate the aforementioned theme, in a High School scenario, as well as clarifying the 2018 BNCC, this work deals with the spectroscopic effect observed from different light sources in whose composition/construction is added some chemical element (more specifically sodium and mercury), in such a way that, through the observation of their streak spectrum, patterns of comparison and identification of components can be found.

Keywords: Physics Teaching. Modern physics. Atomic models. Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO DE ESPECTROSCÓPIO SIMPLIFICADO.	13
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DO FENÔMENO DE DIFRAÇÃO.	14
FIGURA 3 - DIFRAÇÃO DA LUZ NA FENDA DE ENTRADA DO ESPECTROSCÓPIO.	15
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DE UMA GRADE DIFRATORA.	16
FIGURA 5 - PADRÃO DE EMISSÃO DE UMA LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO.	17
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DO MODELO ATÔMICO DE BOHR.	18
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DE ALGUNS DOS POSSÍVEIS RAIOS PARA O ÁTOMO DE BOHR.	19
FIGURA 8 - NÍVEIS DE ENERGIA PARA O ÁTOMO DE BOHR.	21
FIGURA 9 - LINHAS DE EMISSÃO DO SÓDIO.	22
FIGURA 10 - MODELO REAL E MODELO DE MASSA REDUZIDA PARA O ÁTOMO DE HIDROGÊNIO.	24
FIGURA 11 - ESPECTROSCÓPIO, REATOR E LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO.	36
FIGURA 12 - PÁGINA INICIAL DA TABELA PERIÓDICA VIRTUAL.	37
FIGURA 13 - ESPECTRO DE EMISSÃO DO SÓDIO.	37
FIGURA 14 - ESPECTRO DE EMISSÃO DO MERCÚRIO.	39
FIGURA 15 - APRESENTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.	45
FIGURA 16 - FUNCIONAMENTO DA LÂMPADA DE SÓDIO.	46
FIGURA 17 - PARTICIPAÇÃO DOS ESTUDANTES NA OBSERVAÇÃO DO ESPECTRO DE RAIAS DA LÂMPADA DE SÓDIO.	46
FIGURA 18 - INTERAÇÃO DOS ESTUDANTES COM O EXPERIMENTO.	47
FIGURA 19 - OBSERVAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR.	48
FIGURA 20 - SUPERVISÃO DAS OBSERVAÇÕES DOS ESTUDANTES.	49
FIGURA 21 - DISCUSSÕES, PERSPECTIVAS E QUESTIONAMENTOS DOS ESTUDANTES.	49
FIGURA 22 - EXPOSIÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS DO MODELO DE BOHR.	50
FIGURA 23 - QUADRO PARCIAL DA EXPLICAÇÃO SOBRE O MODELO DE BOHR.	51
FIGURA 24 - APRESENTAÇÃO DO VÍDEO EXPLICATIVO SOBRE O ÁTOMO DE BOHR.	52
FIGURA 25 - EXTRATO DO VÍDEO SOBRE O ÁTOMO DE BOHR EVIDENCIANDO DIFERENTES CORES DE CHAMA PARA ELEMENTOS QUÍMICOS DISTINTOS.	53
FIGURA 26 - EXTRATO DO VÍDEO SOBRE O ÁTOMO DE BOHR SIMBOLIZANDO A FORMAÇÃO DO ESPECTRO DE ABSORÇÃO DOS ELEMENTOS.	53
FIGURA 27 - TABELA PERIÓDICA ASSOCIADA AO PRODUTO EDUCACIONAL.	54
FIGURA 28 - MATERIAL UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO ESPECTROSCÓPIO.	76
FIGURA 29 - CORTES SETORIAIS DA PEÇA DE “FOAMCORE”.	77
FIGURA 30 - MONTAGEM INICIAL DO TUBO ESPECTROSCÓPIO.	77
FIGURA 31 - SEÇÃO QUADRADA (100 CM ²) COM ORIFÍCIO (4 CM ²).	78
FIGURA 32 - FENDA DE ENTRADA DE LUZ DO ESPECTROSCÓPIO.	78
FIGURA 33 - JUNÇÃO DO TUBO COM A BASE DA FENDA.	79
FIGURA 34 - PARTE DE TRÁS DO ESPECTROSCÓPIO: PEDAÇO DE CD USADO COMO GRADE DIFRATORA.	79

FIGURA 35 - IMAGEM DA APRESENTAÇÃO DAS INFORMAÇÕES CONSTANTES DA TABELA PERIÓDICA VIRTUAL.80

Lista de Tabelas

TABELA 1 - QUADRO RESUMO DA METODOLOGIA UTILIZADA.....	42
TABELA 2 - RESPOSTAS À QUESTÃO 01, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	57
TABELA 3 - RESPOSTAS À QUESTÃO 02, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	58
TABELA 4 - RESPOSTAS À QUESTÃO 03, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	59
TABELA 5 - RESPOSTAS À QUESTÃO 04, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	61
TABELA 6 - RESPOSTAS À QUESTÃO 05, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	62
TABELA 7 - RESPOSTAS À QUESTÃO 06, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	64
TABELA 8 - RESPOSTAS À QUESTÃO 07, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	65
TABELA 9 - RESPOSTAS À QUESTÃO 08, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	66
TABELA 10 - RESPOSTAS À QUESTÃO 09, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	68
TABELA 11 - RESPOSTAS À QUESTÃO 10, SEPARADAS POR GRUPOS E TURMAS.....	69

Lista de Gráficos

GRÁFICO 1: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 01.	57
GRÁFICO 2: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 02.	58
GRÁFICO 3: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 03.	60
GRÁFICO 4: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 04.	61
GRÁFICO 5: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 05.	63
GRÁFICO 6: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 06.	64
GRÁFICO 7: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 07.	65
GRÁFICO 8: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 08.	67
GRÁFICO 9: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 09.	68
GRÁFICO 10: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS À QUESTÃO 10.	70
GRÁFICO 11: QUANTIDADES E PERCENTUAIS GERAIS POR GRUPO DE RESPOSTAS VÁLIDAS.	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	OBJETIVO GERAL.....	8
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
2	FUNDAMENTOS EDUCACIONAIS/PEDAGÓGICOS	9
3	FUNDAMENTAÇÃO FÍSICA	13
3.1	O ESPECTROSCÓPIO.....	13
3.2	O MODELO DE BOHR	17
3.2.1	<i>Energia do sistema</i>	<i>20</i>
3.3	O MODELO DE SCHROEDINGER PARA ÁTOMOS HIDROGENOIDES.	23
4	PRODUTO EDUCACIONAL.....	36
5	METODOLOGIA.....	40
5.1	VISÃO GERAL DA IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.	40
5.1.1	<i>Quadro resumo sobre a metodologia aplicada.....</i>	<i>42</i>
6	APLICAÇÃO EM SALA DE AULA	45
7	RESULTADOS	56
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
9	REFERÊNCIAS	74
10	APÊNDICE A – O PRODUTO EDUCACIONAL	76
11	ANEXO A – DECLARAÇÃO DE APLICAÇÃO DE PRODUTO EDUCACIONAL.....	84

1 INTRODUÇÃO

Anos a fio se passam e, há muito, pensadores, teóricos, professores e técnicos da educação básica percebem, analisam e debatem sobre os conteúdos e as práticas tomadas no ensino de modo geral. A construção de uma sociedade globalizada, tecnológica, modernizada e atualizada, permeiam as mais variadas formas de discussões sobre os pensares da educação.

Nas ciências naturais estes questionamentos também são bastante amplos, uma vez que delas decorrem todo o aparato tecnológico produzido no planeta. Embora a ciência em si, como pauta de estudo e de conhecimento humano, não tenha a obrigação direta de ser, ou tornar-se, como resultado, aplicação diretamente tecnológica, é fato que toda tecnologia amalhada e melhorada no transcorrer da história da humanidade, encontra sua origem nas análises decorrentes das observações fenomenológicas, das hipotetizações, verificações, matematizações, generalizações e previsões advindas, em suma, do método científico e dos profissionais que se dedicam à ciência.

Destarte, pensando numa possível adequação de conteúdos associados ao ensino de Física dos tempos atuais, este trabalho apresenta uma proposta de aplicação do estudo de espectroscopia elementar para o ensino médio regular, visando alguma atualização dos conteúdos formativos curriculares, que mormente consideram a assim chamada “Física Clássica” na sua construção – trata-se das teorias e experimentações físicas conhecidas e estudadas até o século XIX.

Cabe salientar a indiscutível pertinência e importância da Física Clássica para o entendimento e melhoramento da leitura de mundo de indivíduos em formação, e que jazem escrevendo os próximos capítulos dele. Também, e o objeto deste trabalho é este, faz-se necessária a explicação/instrução sobre aparatos modernos, de uso frequente, que figuram hoje junto a nós em nosso cotidiano comum.

A argumentação e a tratativa de fenômenos físicos abarcados pela teoria quântica, no ensino médio, se fazem pungentes. Com o intuito de observar, verificar, e, também, basear este trabalho, apresentamos, neste capítulo, uma breve revisão da literatura, concernente à pesquisa sobre o Ensino de Física Quântica em nível Médio. Segundo o artigo revisional “Física Quântica no

Ensino Médio: O que dizem as pesquisas” (André Coelho da Silva e Maria José Pereira Monteiro de Almeida, Universidade Faculdade de Educação – Unicamp), de modo geral, é sabido que falar qualitativamente sobre a teoria quântica seria praticamente impossível porque os conceitos e os termos por nós utilizados seriam desenvolvidos a partir de experiências diárias, isto é, nossa linguagem só seria adequada para descrever objetos físicos concretos (Pospiech, 1999 apud Silva e Almeida, 2011). Deste modo, e corroborando a mesma linha de raciocínio, procuramos elaborar um roteiro adaptado ao nível matemático ao qual nos destinamos, aliado a um nível de fenomenologia que pudesse ser interessante e provocativo ao público do Ensino Médio.

Sugestões de aparatos experimentais voltados à espectroscopia para apresentação aos estudantes do ensino básico brasileiro podem ser encontradas em artigos elaborados a partir de produtos educacionais vinculados a programas de mestrados profissionais nacionais, como é o caso dos trabalhos “Sequência didática: Espectroscopia e suas relações com o cotidiano”, autoria de Marcelo Klipton Do O. Teixeira Santos, orientação do Prof. Dr. João Furtado de Souza, da Universidade Federal do Pará, e “Introdução de tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio”, de Sônia Rodrigues Martins, orientação do Prof. Dr. Ronni Geraldo Gomes de Amorim, da Universidade de Brasília. Ambos versam sobre temas que são abordados nos presentes texto e produto: o primeiro tem seu foco direcionado, mormente à espectroscopia (histórico, contexto, aplicação); o segundo pondera sobre conceitos de Mecânica Quântica, tais como dualidade onda partícula, tunelamento, comportamento probabilístico e afins. Outro trabalho resultado da aplicação de produto educacional relativo à espectroscopia no ensino médio, que podemos citar tem autoria de Everaldo Mateus da Silva, orientação do Prof. Dr. Elvis Lira da Silva, e coautoria do Prof. Dr. Rogério Junqueira Prado, da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, intitulado “Uma Sequência Didática para o Ensino da Espectroscopia no Ensino Médio por meio da Experimentação”. Tanto a sequência didática implementada nele, quanto o produto educacional utilizado, apresentam similaridades quanto à temática e à fenomenologia abordada em nosso roteiro, diferindo tanto na construção do experimento físico, no arcabouço matemático de maior rigor (para ser usado

como fonte de pesquisa para o estudante), quanto na inserção do aparato virtual – optamos pela construção de um aparato virtual próprio.

O trabalho que aqui se apresenta, toma a liberdade de tentar debater, matematizar, e oferecer uma explicação acessível, dentro, claro, de suas limitações, no tangente aos dois temas supracitados: o efeito espectroscópico, aliado à identificação de amostras, substâncias e componentes, além dos compostos presentes em corpos celestes, que perpassam as instruções sobre efeitos ondulatórios e corpusculares da luz, bem como a interação da mesma com a matéria. Esta última tem suas características descritas absolutamente pela teoria quântica.

Cabe aqui ressaltar a relevância do artigo intitulado “Espectroscopia e modelos atômicos: uma proposta para a discussão de conceitos de Física Moderna no Ensino Médio”, autoria de Fábio Bartolomeu Santana, e Paulo José Sena dos Santos, do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina, na construção da análise de resultados das respostas coletadas e avaliadas neste trabalho. Construído em cima de uma sequência didática alicerçada em conceitos de Física Moderna, tais como modelos atômicos, incluindo o átomo de Bohr, a separação da análise das respostas dos estudantes em grupos categorizados, teve influência direta na sistemática apresentada no nosso capítulo de resultados.

Os capítulos que se seguem tiveram sua redação motivada por uma questão levantada por um estudante, no ano de 2019: seria possível saber, de alguma forma, a composição da “coca-cola”? Neles, abordamos conteúdos relacionados à espectroscopia como forma de identificação química de amostras, recorrendo, para isto, à quantização proposta por Niels Bohr em seu modelo atômico, e às observações dos espectros de absorção (e emissão) feitas por Bunsen e Fraunhofer. Estas observações e teorias constituíram as matrizes para a construção do produto educacional proposto neste trabalho, que fora aplicado nas dependências do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Goiás, campus Aparecida de Goiânia, em julho de 2022, no transcorrer das aulas comuns das terceiras séries dos cursos de nível médio integrados aos cursos técnicos em alimentos, edificações e química.

A sequência didática apresentada, parte integrante deste trabalho, e que consta no capítulo Metodologia, segue o ordenamento proposto por Paulo

Freire e seus três momentos pedagógicos (DELIZOICOV, P.28). Nela consideramos, para melhor abordagem e aplicação, os objetivos de estudo elencados nas seções subsequentes.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo base é apresentar uma abordagem mais elucidativa sobre algumas temáticas que se conversam, tais como óptica geométrica, ondulatória, energia, eletrostática e física moderna, constituintes comuns dos programas pedagógicos dos cursos do ensino básico regular, através da análise dos resultados da aplicação de uma sequência didática sobre espectroscopia utilizando aparato experimental de baixo custo – espectroscópio, e aparato computacional, especificamente descrito e disposto na internet – tabela periódica virtual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Apresentar o tema deste trabalho aos estudantes, através de indagações e questionamentos sobre a natureza da luz e sobre as formas de detecção da composição de amostras.

Observar o que os mesmos traziam de conhecimento prévio sobre tais assuntos.

Compreender as características físicas da luz, seu espectro visível, algumas nuances sobre interferometria, a descrição apresentada pelo modelo atômico de Bohr e sua consequente análise para os espectros de emissão e absorção.

Compreender a importância dos modelos atômicos para a espectroscopia, e desta última para a análise e identificação de substâncias, amostras e, até, corpos celestes.

2 FUNDAMENTOS EDUCACIONAIS/PEDAGÓGICOS

A Física é uma ciência que permite ao estudante investigar os mistérios do mundo macroscópico e microscópico, das partículas que compõem a matéria, ao mesmo tempo em que permite desenvolver novas fontes de energia e criar novos materiais, produtos e tecnologias, tornando-se assim, indispensável à formação da cidadania contemporânea (ARAÚJO, MUENCHEN, 2018, p. 188). Assim, compreender Física enquanto área do conhecimento é necessária para a formação do estudante de ensino médio. O trabalho didático-pedagógico desenvolvido pelo professor pode permitir aos estudantes apreender conceitos, leis, relacionar os conceitos físicos (de origem natural ou tecnológica) ao seu cotidiano (ARAÚJO, MUENCHEN, 2018).

Neste aspecto, o professor deve utilizar ferramentas e propostas de ensino que promovam a construção da aprendizagem, considerando os conhecimentos prévios dos estudantes, “estabelecendo relações de mundo e estimulando a participação do mesmo em sala de aula” (SANTOS, et al, 2022, p. 4). Entretanto, é fundamental considerar e verificar a eficácia da ferramenta pedagógica por meio dos estudantes, detectando sua evolução no decorrer das aulas.

Geralmente, o ensino de Física na contemporaneidade estimula a aprendizagem mecânica de conteúdos desatualizados, centrados no docente, focando no treinamento para as provas, ensinando respostas corretas, sem questionamentos e considerando a Física como uma ciência acabada e pronta (SANTOS, et al, 2022).

Os autores contribuem com a temática ao afirmar que “a proposição de alternativas de aprendizado da Física regular vem ocorrendo desde muitos anos, desmistificando a ideia tradicional de ensino baseado apenas na formalização matemática” (SANTOS, et al, 2022). Entre as ferramentas que podem ser utilizadas pelos professores de Física, destacamos a experimentação como possibilidade de aproximar alunos, professores e disciplina. De acordo com Moraes (2020, p. 57), “experimentos elaborados a partir de uma organização pedagógica, permitem que haja, além da

compreensão dos conceitos, aplicação no cotidiano dos alunos, levando esse conhecimento para toda sua vida”.

As práticas experimentais contribuem para a interação professor e aluno, tornando-se “um caminho para as aulas mais dinâmicas, dialogadas e problematizadoras, estabelecendo uma conexão entre o senso comum dos educandos e a apropriação do conhecimento científico, refletindo diretamente em seu cotidiano” (SANTOS, et al, 2022, p. 5). Nesta perspectiva, vamos utilizar como abordagem metodológica, os Três Momentos Pedagógicos (3MPs), inseridos com o objetivo de auxiliar o processo de ensino e aprendizagem de Física, possibilitando um maior envolvimento dos alunos na construção de seu próprio conhecimento, por meio das práticas experimentais.

Os Três Momentos Pedagógicos - Problematização Inicial, Organização do Conhecimento e Aplicação do Conhecimento, foram propostos por Delizoicov e Angotti (1990), originados da transposição da concepção de Paulo Freire (1987) “para um contexto de educação formal, que enfatiza uma educação dialógica, na qual o professor deve mediar uma conexão entre o que aluno estuda cientificamente em sala de aula, com a realidade de seu cotidiano” (BONFIM; COSTA; NASCIMENTO, 2018, p. 188).

Segundo Muenchen e Delizoicov (2014, p. 620), os três momentos pedagógicos estão assim estruturados:

Problematização Inicial: apresentam-se questões ou situações reais que os alunos conhecem e presenciam e que estão envolvidas nos temas. Nesse momento pedagógico, os alunos são desafiados a expor o que pensam sobre as situações, a fim de que o professor possa ir conhecendo o que eles pensam. Para os autores, a finalidade desse momento é propiciar um distanciamento crítico do aluno ao se defrontar com as interpretações das situações propostas para discussão, e fazer com que ele sinta a necessidade da aquisição de outros conhecimentos que ainda não detém.

Organização do Conhecimento: momento em que, sob a orientação do professor, os conhecimentos de física necessários para a compreensão dos temas e da problematização inicial são estudados.

Aplicação do Conhecimento: momento que se destina a abordar sistematicamente o conhecimento incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram seu estudo quanto outras que, embora não estejam diretamente ligadas ao momento inicial, possam ser compreendidas pelo mesmo conhecimento.

Neste, o primeiro momento da sequência didática, a problematização inicial, consiste numa sondagem, tendo como eixo principal o conhecimento prévio dos estudantes. Para Freire (2009, p. 17), ensinar exige criticidade, sendo construída por meio da superação de uma “curiosidade ingênua que, “desarmada”, está associada ao saber do senso comum, (...) se torna curiosidade epistemológica”, orientados por princípios de pesquisa que ultrapassa a predisposição espontânea. “Essa superação não se dá automaticamente, mas, sim, por meio de mediações ativas mobilizadas por questionamentos que desafiam os alunos a refletir criticamente sobre situações reais que os cercam” (ABREU, FERREIRA, FREITAS, 2017, p. 2). Os autores afirmam ainda que essa ruptura da curiosidade ingênua para uma curiosidade epistemológica, é um dos propósitos da problematização inicial, despertando a curiosidade do estudante para a conquista de um conhecimento que ele ainda não tem.

De acordo com Delizoicov e Muenchen (2018), neste momento o professor deve ter uma postura mais questionadora, lançando dúvidas sobre o assunto estudado para responder e fornecer explicações posteriormente. Estes questionamentos levarão os estudantes a formularem novas hipóteses, as quais conduzem à reconstrução das concepções científicas.

Ao realizar a primeira etapa o professor terá as impressões iniciais dos estudantes; procede-se então o segundo momento, a organização do conhecimento, na qual o professor passa a intervir, oferecendo subsídios conceituais para o pleno entendimento do fenômeno, ampliando o conhecimento dos alunos, corrigindo os possíveis equívocos (do senso comum) sobre o conteúdo estudado. “O desfecho dessa etapa ocorre por meio da troca de saberes e diálogo sobre o tema, que, no caso da pesquisa, pode ser feito por meio do uso de jogos” (SANTOS, et al, 2022, p. 5).

Para Moraes (2020); Abreu, Ferreira, Freitas, (2017), neste momento é inserido o conhecimento científico necessário para aprendizagem do tema problematizador, objetivando a compreensão dos questionamentos levantados na problematização inicial. É importante o professor pensar em diversas estratégias, devendo trabalhar diversas atividades, como: exposição, formulação de questões, vídeos trabalhos, revisão e experimento.

Na terceira parte ocorre a aplicação do conhecimento, ou seja, este é o momento que o professor aborda de maneira sistemática o conhecimento aprendido pelo estudante, para analisar e interpretar as situações iniciais, constatando se conseguiram adquirir os conhecimentos. Para esse momento, o professor deve pensar em diversas estratégias, a fim de romper com atividades tradicionais, estimulando reflexões críticas, não restringindo-se em memorização e reprodução de conceitos, mas possibilitando aos estudantes perceber que os conceitos poderão ser aplicados em seu cotidiano (MORAES, 2020; ABREU, FERREIRA, FREITAS, 2017).

Assim, é necessário propor atividades que possibilitem o diálogo, para analisar se o estudante adquiriu a “capacidade de argumentar e de participar, de forma crítica, das decisões que envolvem os temas/problemas contemporâneos” (ABREU, FERREIRA, FREITAS, 2017, p. 7). Por fim, os estudantes serão capazes de compreender, analisar e interpretar situações problemas inicialmente propostos.

Em relação ao nosso tema de trabalho, mostraremos mais explicitamente, no capítulo Metodologia, como serão organizadas nossas aulas em relação aos três momentos pedagógicos aqui discutidos. De antemão, destacamos a indagação sobre a composição da “coca-cola” e sobre a composição química dos planetas como estímulos provocadores e também verificadores de conhecimentos prévios. Em seguida, a observação do efeito espectroscópico e de suas análises físicas, para, enfim, estabelecermos as verificações e possíveis conclusões sobre a pauta fenomenológica em voga.

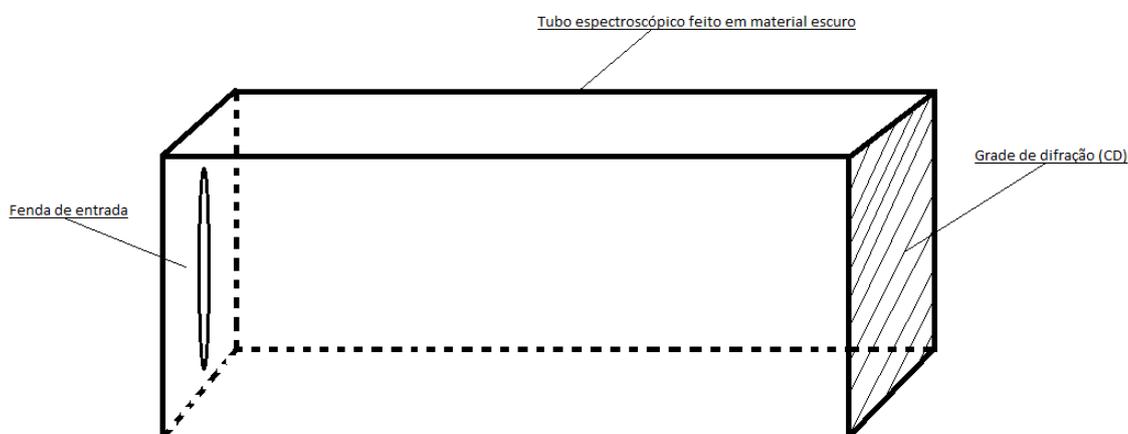
3 FUNDAMENTAÇÃO FÍSICA

Discutiremos, doravante, nesta seção, os argumentos físicos que foram utilizados na explicação do fenômeno espectroscópico que fora apresentado aos estudantes secundaristas anunciados no capítulo introdutório. Faz-se necessário salientar que a ênfase dada no transcorrer da explicação do fenômeno supracitado, esteve deveras atrelada ao arranjo atômico proposto por Bohr, seu ordenamento energético, e, portanto, suas transições entre estados excitados (mais energéticos) e o estado fundamental dos elétrons no átomo. No entanto, o modelo atômico proposto por Schroedinger, por ser o mais atual e completo (apesar da complexidade), careceu também de apresentação e argumentação, ainda que resumida ou simplificada para o nível ao qual se destinava. Segue, portanto, as argumentações físicas e matemáticas envolvidas na construção e nas análises destes dois cientistas, além das conceituações sobre difração e interferência presentes na formação dos padrões de emissão observados no aparelho.

3.1 O ESPECTROSCÓPIO

Nosso aparato experimental pode ser descrito segundo o modelo disposto a seguir (Figura 1).

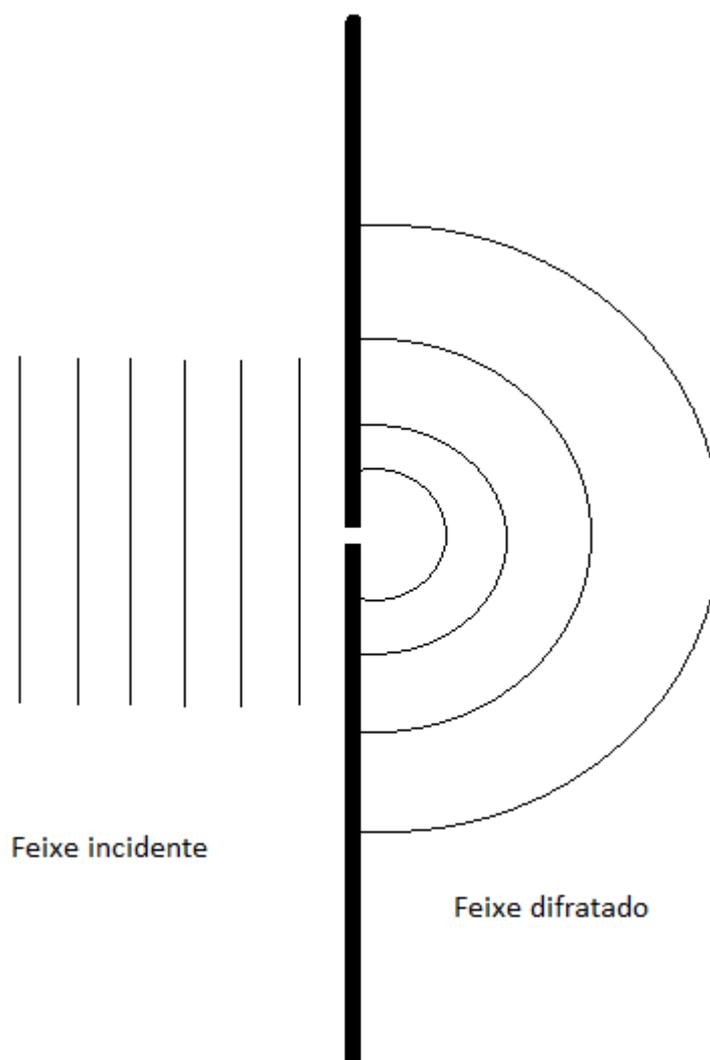
Figura 1 - Modelo de espectroscópio simplificado.



Fonte: o autor – 2022.

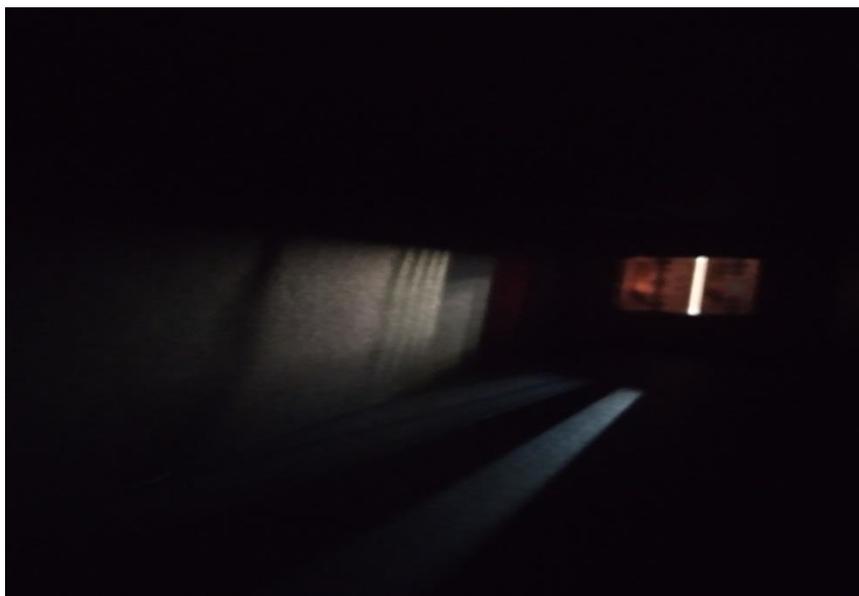
O espectroscópio é um aparelho no qual, basicamente, percebemos os efeitos das características ondulatórias da luz. Na primeira face do tubo, à esquerda, colocamos uma pequena fenda, de modo a permitir a passagem apenas de uma porção limitada – um feixe, de luz proveniente da fonte luminosa a ser observada. No atravessar da luz por esta fenda de entrada, já acontece o fenômeno ondulatório conhecido como difração. Trata-se da interação de uma onda com um obstáculo que pode, de alguma forma, ser contornado. No nosso modelo, o feixe luminoso encontra uma fenda que, por ter dimensões diminutas, provoca o efeito, respeitando o princípio de Huygens. A figura a seguir nos permite um breve vislumbre da situação descrita.

Figura 2 - Representação do fenômeno de difração.



O princípio de Huygens prevê que cada ponto, ou quaisquer pontos de uma frente de ondas, incidentes numa barreira, funcionam como novas fontes de ondas secundárias, desde que as dimensões da fenda, no obstáculo, sejam da ordem do comprimento de onda do feixe incidente. Tal fenômeno gera um padrão luminoso de “claro e escuro”, conforme podemos observar na figura 3, na sequência.

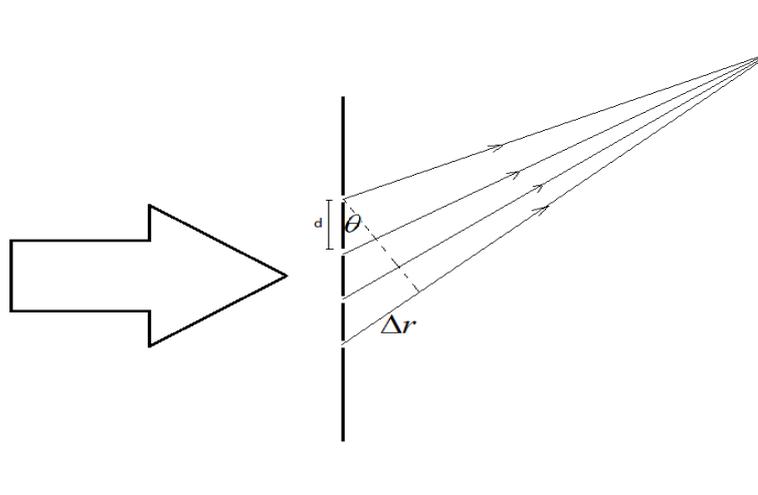
Figura 3 - Difração da luz na fenda de entrada do espectroscópio.



Fonte: o autor – 2022.

O feixe de luz difratado encontra uma grade de difração, feita de um pedaço de CD, na face justaposta. Uma grade de difração nada mais é que um conjunto de fendas equidistantes umas das outras, cuja função é promover vários fenômenos difratores capazes de formar padrões luminosos através de interferência. O feixe de luz incidente é difratado diversas vezes através das microrranhuras contidas no CD, resultando num padrão de interferência correspondente aos componentes constituintes da fonte luminosa. A figura 4 visa exemplificar o fenômeno descrito.

Figura 4 - Representação de uma grade difratora.



Fonte: o autor – 2022.

Nela, d representa a distância entre as fendas, e Δr , o desvio no caminho óptico percorrido pelos feixes difratados, até que atinjam o anteparo.

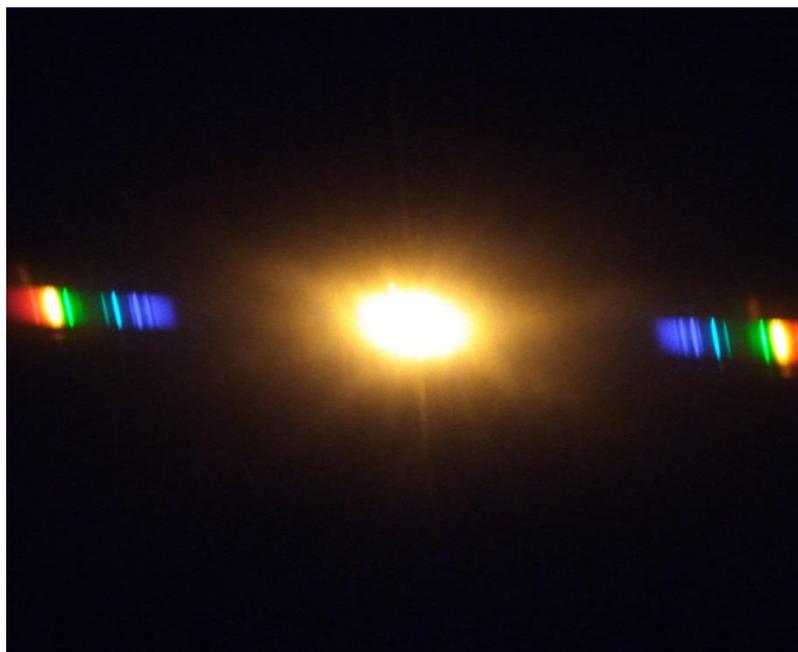
Para que haja a formação de um padrão luminoso, faz-se necessário que as ondas difratadas estejam “em fase”. Significa dizer que a diferença de caminho óptico, Δr , entre os feixes, deve ser múltipla inteira do comprimento de onda das ondas interferentes (condição de interferência construtiva). Logo, podemos escrever:

$$\Delta r = d \sin \theta = n \lambda , \quad (1)$$

onde $n = 1, 2, 3, \dots$

A medida do ângulo de desvio, θ , dependerá da frequência da luz que passará pelo processo descrito. Ou seja, dependerá da cor do feixe de luz incidente. Em nosso modelo, utilizamos fontes que produziam luz policromática. Tendo em vista o fenômeno de dispersão, e aliando esta ideia ao efeito da difração, podemos explicar a formação de padrões tipo “arco-íris” observado em nosso experimento, como se vê na figura 5, que mostra uma imagem do padrão de emissão de uma lâmpada de vapor de sódio.

Figura 5 - Padrão de emissão de uma lâmpada de vapor de sódio.

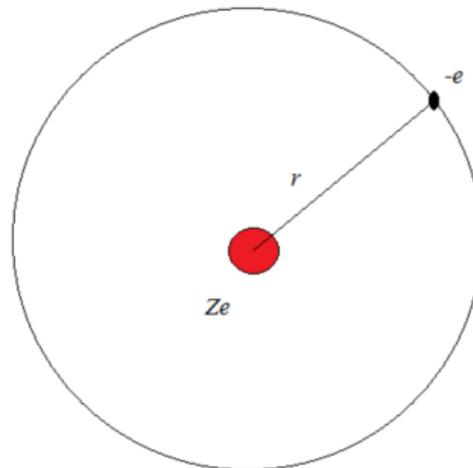


Fonte: o autor – 2022.

3.2 O MODELO DE BOHR

Niels Bohr foi o responsável pela criação de um modelo atômico baseado num arranjo clássico de movimento circular, mantido por um potencial central – neste caso a interação elétrica, acrescido de uma suposição na qual os raios das órbitas ocupadas pelos elétrons só poderiam assumir certos valores múltiplos inteiros de uma certa quantidade. Esta última suposição, que é conhecida como quantização do momento angular, conduzia os resultados na direção da quantização da energia também, trazendo luz ao entendimento e à explicação dos efeitos espectroscópicos observados (mencionados e mostrados em sala).

Figura 6 - Representação do modelo atômico de Bohr.



Fonte: o autor – 2022.

O modelo de Bohr (Fig. 6), por tratar-se de um modelo basicamente semiclássico (eletromecânico), pode ser resolvido aplicando-se o princípio fundamental da dinâmica:

$$F_R = ma. \quad (2)$$

Neste caso, há a ação apenas da força elétrica, mantenedora do movimento circular do elétron. Portanto:

$$F_{el} = ma_{cp}, \quad (3)$$

onde $a_{cp} = \frac{v^2}{r}$, é a aceleração centrípeta. Aplicando-se a lei de Coulomb, segue que:

$$\frac{kZe^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

Para darmos continuidade no desenvolvimento da eq. (4), se faz necessário, agora, a introjeção do fator de quantização do momento angular.

Momento angular, representado pela letra l , refere-se ao análogo do momento linear (quantidade de movimento) em trajetórias curvilíneas. Seu valor clássico equivale a $l = mrv$. Entretanto, Bohr propõe a seguinte regra:

$$l = mrv = n\hbar, \quad (5)$$

sendo $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, uma constante muito conhecida no mundo subatômico (constante de Planck), e $n = 1, 2, 3, \dots$, um número inteiro.

Isolando a velocidade na eq. (5), obtemos:

$$v = \frac{n\hbar}{mr}. \quad (6)$$

Aplicando a eq. (6) na eq. (4), segue que:

$$\frac{kZe^2}{r^2} = \frac{m}{r} \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 r^2} \quad (7)$$

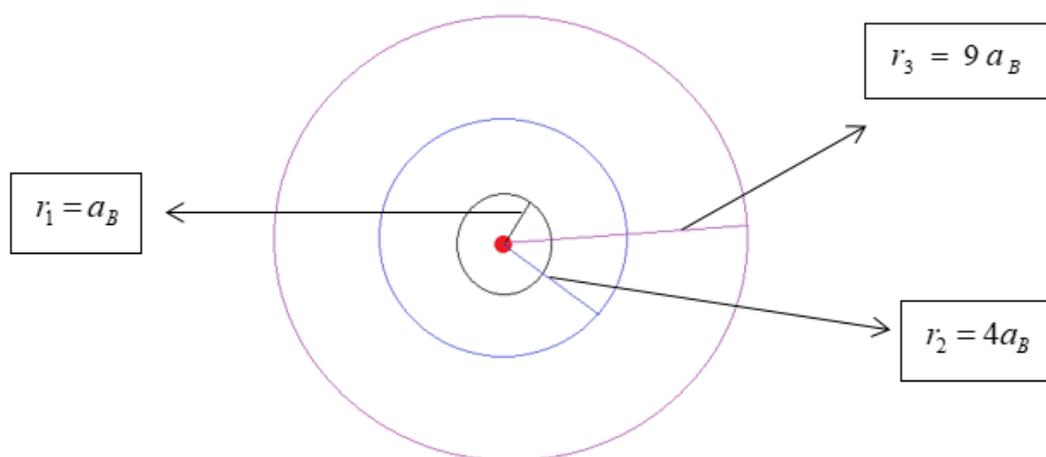
$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{kmZe^2} \quad (8)$$

$$r_n = n^2 a_B. \quad (9)$$

Na eq. (9), $a_B = \frac{\hbar^2}{kmZe^2}$ é o raio de Bohr, cujo valor é de 0,529 Å. A unidade Å (angström), é equivalente a $10^{-10}m$. O que significa dizer que o diâmetro do átomo de hidrogênio é de 1 Å.

Isto significa dizer que os raios possíveis para as órbitas do elétron do átomo de hidrogênio, assumem apenas valores bem definidos, múltiplos inteiros do raio de Bohr. Ou seja, as órbitas são quantizadas. A figura 7, a seguir, dá uma ideia do que queremos dizer.

Figura 7 - Representação de alguns dos possíveis raios para o átomo de Bohr.



Fonte: o autor – 2022.

Segundo este modelo, as lacunas entre as órbitas não são ocupadas (regiões não permitidas).

3.2.1 ENERGIA DO SISTEMA

A energia total do elétron em uma das órbitas do átomo de hidrogênio é calculada como a soma de sua energia cinética (parte associada ao movimento) com sua energia potencial (neste caso, potencial elétrica):

$$E = E_c + E_p \quad (10)$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{kZe^2}{r}. \quad (11)$$

Na eq. (11) aplicamos o resultado da quantização (eq. (6)), e, após algumas operações algébricas, concluímos que:

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{kZe^2}{n^2 a_B} \quad (12)$$

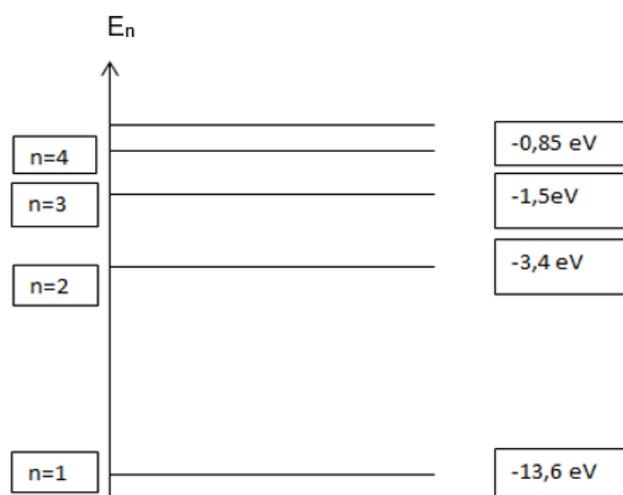
$$E_n = -\frac{1}{n^2} E_R, \quad (13)$$

Onde $E_R = \frac{ke^2}{2a_B}$, é a energia de Rydberg, cujo valor é 13,6 eV, referindo-

se ao módulo da energia de um elétron no estado fundamental.

Graficamente, podemos representar os resultados obtidos da eq. (13) da seguinte maneira (Figura 8):

Figura 8 - Níveis de energia para o átomo de Bohr.



Fonte: o autor – 2022.

A determinação da cor do fóton emitido por um átomo é obtida através do comprimento de onda calculado pela diferença entre dois níveis de energia:

$$\Delta E = E_n - E_f \quad (14)$$

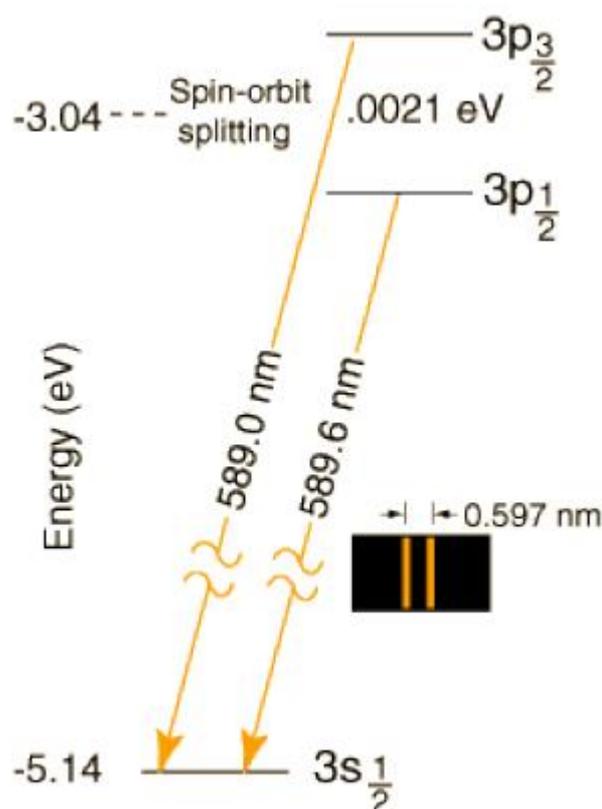
$$\frac{hc}{\lambda_n} = -E_R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (15)$$

$$\frac{1}{\lambda_n} = -\frac{E_R}{hc} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (16)$$

$$\frac{1}{\lambda_n} = -\frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (17)$$

Em resumo, no experimento trabalhado com os alunos, um feixe de luz de uma lâmpada fria é difratado pelo lado esquerdo do dispositivo. Cada cor ou componente dessa luz sofre interferência construtiva ao passar pelas fendas da grade de difração no lado direito do dispositivo, segundo ângulos diferentes dados pela equação 1. Como os ângulos são diferentes, essa luz vai tocar em pontos diferentes do anteparo, em várias linhas chamadas de emissão. Parte da luz da lâmpada é devida à luz emitida pelos elementos químicos aquecidos presentes, como o sódio presente na lâmpada de vapor de sódio. O sódio aquecido emite algumas linhas características como o amarelo, que é justamente a luz emitida na transição do nível 3p para o nível 3s (Figura 9).

Figura 9 - Linhas de emissão do sódio.



Fonte: The Sodium Doublet (disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/sodzee.html>).

O modelo de Bohr prevê valores corretos para os níveis de energia do átomo, mas encontra limitações na descrição das transições entre estados excitados e o estado fundamental. Estas transições são governadas exclusivamente pelas propriedades das, assim chamadas, autofunções atômicas, que podem ser determinadas através da solução da equação de Schroedinger para átomos hidrogenoides. Tão logo, existem regras de seleção que explicam as transições, e estas formam um conjunto de condições sobre os números quânticos das autofunções dos estados de energia inicial e final (EISBERG; RESNICK, pg. 373). O já citado caso da emissão do sódio pode constituir-se como fator motivador das argumentações e demonstrações incluídas na próxima seção: A formação do dubleto, mostrado na figura 10, se dá por existir uma pequena diferença de energia naquela transição (correspondente à linha D de Fraunhofer), pois os elétrons do nível 3p podem

apresentar números quânticos de spin $\pm \frac{1}{2}$, o que faz com que haja um acoplamento entre seus estados descritos pelos seus números quânticos associados ao momento angular orbital (l) e o de spin (s) (MARQUES, *et al.* 2006). Um aspecto particularmente agradável da teoria de Schroedinger é que quase todo trabalho aplicado aos átomos monoelétrônicos se adapta diretamente aos multieletrônicos (EISBERG; RESNICK, pg. 378).

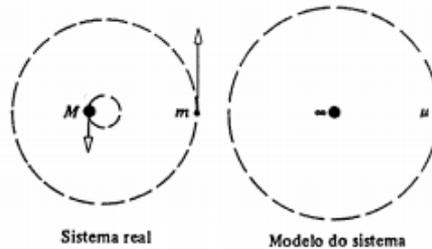
Para além do supracitado, o tratamento dado ao modelo atômico de Schroedinger da seção subsequente foi pensado para ser usado como facilitador no entendimento das soluções provenientes do mesmo, podendo ser utilizado por estudantes de graduação de cursos que envolvam Física Moderna, quanto por colegas de área profissional. Deste modo, optamos por apresentar uma descrição matemática formal e detalhada para os números quânticos que aparecem como resultado das soluções angulares e radial da equação de Schroedinger em coordenadas esféricas, incluindo pequenas discussões sobre os resultados encontrados.

3.3 O MODELO DE SCHROEDINGER PARA ÁTOMOS HIDROGENOIDES.

Por tratar-se da estrutura atômica mais simples conhecida, o hidrogênio apresenta características de grande interesse físico, no que tange à explicação de vários fenômenos elementares, como a quantização da energia proposta por Bohr e endossada por Schroedinger (1927), bem como a aplicação de seu modelo para átomos dotados de mais elétrons (polieletrônicos/multieletrônicos). Sua estrutura-base conta somente com 1 (um) próton e 1 (um) elétron, mantidos por atração coulombiana.

O tratamento matemático deste modelo tem início trocando-se o modelo real pelo de massa reduzida, no qual o núcleo é afixado na origem, e a análise fica por conta somente do movimento eletrônico (Figura 10).

Figura 10 - Modelo real e modelo de massa reduzida para o átomo de hidrogênio.



Fonte: Eisbergh e Resnick, Física Quântica (p. 302).

Este modelo de movimentação eletrônica se assemelha muito ao caso de uma partícula presa em uma caixa, em que o vínculo representado pelas paredes é trocado pela força que mantém o elétron preso ao núcleo atômico. Deste modo, podemos escrever, classicamente, a energia do sistema como:

$$E = \frac{1}{2\mu}(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) + V(r) \quad (18)$$

Trocamos, agora, os momentos lineares por seus respectivos operadores, e procedemos sua atuação na função de onda (espaço-temporal) que deve, em princípio, nos mostrar o comportamento deste átomo.

$$p_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \quad (19)$$

$$p_y = -i\hbar \frac{\partial}{\partial y} \quad (20)$$

$$p_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial z} \quad (21)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi(x, y, z, t) + V(x, y, z) \Psi(x, y, z, t) = E \Psi(x, y, z, t) \quad (22)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \Psi(x, y, z, t) + V(x, y, z) \Psi(x, y, z, t) = E \Psi(x, y, z, t) \quad (23)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \Psi(x, y, z, t) + V(x, y, z) \Psi(x, y, z, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (24)$$

onde o operador energia $E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$.

Utilizando o método de separação de variáveis, podemos estabelecer a solução temporal da Eq. 8, da seguinte maneira:

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z)\varphi(t), \quad (25)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \varphi(t) \nabla^2 \psi(x, y, z) + V(x, y, z) \psi(x, y, z) \varphi(t) = i\hbar \psi(x, y, z) \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}. \quad (26)$$

Dividimos ambos os lados da equação por $\psi(x, y, z)\varphi(t)$:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{1}{\psi(x, y, z)} \nabla^2 \psi(x, y, z) + V(x, y, z) = i\hbar \frac{1}{\varphi(t)} \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}. \quad (27)$$

Esta última equação só encontra solução quando suas partes, espacial e temporal, forem iguais a uma constante. Portanto,

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{1}{\psi(x, y, z)} \nabla^2 \psi(x, y, z) + V(x, y, z) = i\hbar \frac{1}{\varphi(t)} \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} = C. \quad (28)$$

Tomaremos primeiro sua parte temporal:

$$i\hbar \frac{1}{\varphi(t)} \frac{d\varphi(t)}{dt} = C, \quad (29)$$

onde mudamos a notação da derivada por termos uma única função exclusiva no tempo - $\varphi(t)$. Continuando, segue que:

$$\frac{d\varphi(t)}{\varphi(t)} = \frac{C}{i\hbar} dt \quad (30)$$

$$\ln \varphi(t) = \frac{C}{i\hbar} t + k \quad (31)$$

$$\varphi(t) = k e^{\frac{-iCt}{\hbar}}. \quad (32)$$

Este resultado é conhecido como "solução tipo onda plana", cuja frequência angular ω vale:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{C}{\hbar} = \frac{2\pi C}{h} \quad (33)$$

$$\nu = \frac{C}{h}. \quad (34)$$

Mas, segundo Einstein, $E = h\nu$, portanto

$$C = E, e$$

$$\varphi(t) = ke^{\frac{-iEt}{\hbar}}. \quad (35)$$

A constante de integração k pode ser determinada utilizando-se a condição de normalização para as funções de onda

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(x, y, z, t) \Psi(x, y, z, t) dv = 1 \quad (36)$$

$$|k|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*(x, y, z) \psi(x, y, z) dv = 1 \quad (37)$$

$$|k| = 1 \quad (38)$$

$$\varphi(t) = e^{\frac{-iEt}{\hbar}}. \quad (39)$$

De posse da solução temporal, reescrevemos agora a função de onda para o átomo de hidrogênio sob a forma

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{\frac{-iEt}{\hbar}}. \quad (40)$$

Interessa-nos agora resolver a parte espacial da eq. (40), conhecida como equação de Schroedinger independente do tempo (ESIT). Substituindo (40) na eq. (23), obtemos:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{1}{\psi(x, y, z)} \nabla^2 \psi(x, y, z) + V(x, y, z) = E \quad (41)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi(x, y, z) + V(x, y, z) \psi(x, y, z) = E \psi(x, y, z). \quad (42)$$

O operador diferencial ∇^2 , conhecido como laplaciano, tem, em coordenadas esféricas, a seguinte representação:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}, \quad (43)$$

Que será aplicada à ESIT em conjunto a uma nova separação de variáveis, de modo a darmos andamento à solução espacial da equação. Para este fim, procederemos, primeiramente, uma transformação de coordenadas onde faremos

$$\psi(x, y, z) \rightarrow \psi(r, \theta, \varphi), e$$

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi). \quad (44)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \left\{ \frac{\Theta\Phi}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{R\Phi}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) + \frac{R\Theta}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} \right\} + V(r)R\Theta\Phi = ER\Theta\Phi$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{1}{\Theta \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\Phi \sin^2\theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} - \frac{2\mu r^2}{\hbar^2} V(r) = -\frac{2\mu r^2}{\hbar^2} E. \quad (45)$$

Separando a parte azimutal, temos:

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} = -\frac{2\mu r^2}{\hbar^2} (E - V(r)) \sin^2\theta - \frac{\sin^2\theta}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial R}{\partial r} \right) + \frac{\sin\theta}{\Theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} \right). \quad (46)$$

A equação acima só encontra solução se ambos os termos forem iguais a uma constante (que chamaremos de C). Sigamos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} &= C \\ \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} - C\Phi &= 0 \end{aligned} \quad (47)$$

Cuja equação característica é $\lambda^2 - C = 0 \Rightarrow \lambda = \pm\sqrt{C}$. Fazendo $C = (im)^2$, concluímos que

$$\Phi(\varphi) = e^{im\varphi} + e^{-im\varphi} \quad (48)$$

$$\Phi(\varphi) = 2 \cos(m\varphi). \quad (49)$$

Aplicando as condições de continuidade, temos que

$$\Phi(0) = 2 = \Phi(2\pi) = 2 \cos(2\pi m) \quad (50)$$

$$\therefore \cos(2\pi m) = 1 \Rightarrow 2\pi m = n \cdot 2\pi, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (51)$$

$$|m| = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (52)$$

$$\Phi_m(\varphi) = e^{im\varphi}, \quad (53)$$

que é a solução azimutal da ESIT. O número quântico m é chamado de número magnético, e está associado à orientação espacial do elétron.

Doravante prosseguiremos com a solução radial da ESIT. Para tal, lançaremos mão do operador momento angular já conhecido, assim descrito (EISBERGH; RESNICK, pg. 328)

$$\hat{L}^2 = -\hbar^2 \left[\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} (\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta}) + \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\varphi^2} \right], \quad (54)$$

além da representação $\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)F(\theta, \varphi)$, para a função de onda espacial, submetida à condição de normalização. Segue que:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + r^2 E - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} r = -\frac{1}{2\mu F(\theta, \varphi)} \hat{L}^2 F(\theta, \varphi). \quad (55)$$

Sabemos que $\hat{L}^2 F(\theta, \varphi) = \hbar^2 l(l+1) F(\theta, \varphi)$ (EISBERGH; RESNICK, pg. 330), portanto:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \hbar^2 l(l+1) R - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} r R = E r^2 R \quad (56)$$

$$2r \frac{dR}{dr} + r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} - 2\mu l(l+1) R + \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0} r R = -\frac{2\mu E}{\hbar^2} r^2 R. \quad (57)$$

Utilizando $\frac{d^2}{dr^2} (rR) = r \frac{d^2 R}{dr^2} + 2 \frac{dR}{dr}$, e reorganizando os termos, temos:

$$\frac{d^2}{dr^2} (rR) = \{V_{ef} - E\} rR, \quad (58)$$

onde $V_{ef} = V(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r}$ representa o potencial efetivo, composto pelo potencial coulombiano acrescido do termo clássico de potencial repulsivo centrífugo.

Esta última equação trata-se de uma equação diferencial cuja solução não é trivial. Apresentaremos, neste texto, uma proposta de solução que requererá as seguintes mudanças de variáveis:

$$R(r) = \frac{u(r)}{r}, \quad (59)$$

$$\rho = kr, \quad (60)$$

$$A = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0}, \quad (61)$$

$$\rho_0 = Ak. \quad (62)$$

Aplicando tais transformações e reorganizando os termos, podemos escrever

$$u''(\rho) = \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{l(l+1)}{\rho^2}\right]u(\rho). \quad (63)$$

Neste ponto, analisaremos a equação sob a ótica de um esperado comportamento assintótico para a construção de sua solução. Observamos que para $\rho \rightarrow \infty \Rightarrow u''(\rho) \approx u(\rho)$. Ou seja,

$$u''(\rho) - u(\rho) = 0 \quad (64)$$

$$\therefore u(\rho) = Ae^{\rho} + Be^{-\rho}. \quad (65)$$

O primeiro termo desta solução é absolutamente divergente, não servindo, portanto, ao nosso propósito, uma vez que aumentando muito a distância entre o elétron e o núcleo, esperamos que a solução radial seja zero (o sistema se rompe). Façamos

$$A = 0 \Rightarrow B = 1,$$

$$\therefore u(\rho) = e^{-\rho}. \quad (66)$$

Tomando agora o limite para pequenas distâncias, qual seja $\rho \rightarrow 0$, observamos que

$$u''(\rho) \approx \frac{l(l+1)}{\rho^2}u(\rho). \quad (67)$$

Devido à sua forma, proporemos a seguinte solução:

$$u(\rho) = \rho^{\beta}; \quad (68)$$

$$\therefore \beta(\beta-1)\rho^{\beta-2} = l(l+1)\rho^{\beta-2}, \quad (69)$$

$$\beta^2 - \beta - l(l+1) = 0, \quad (70)$$

que é uma equação do segundo grau, que admite as soluções $\beta_1 = -l$ e $\beta_2 = l+1$. Portanto temos

$$u_1(\rho) = \rho^{-l} \text{ e } u_2(\rho) = \rho^{l+1}. \quad (71)$$

A primeira solução diverge na origem, sendo, portanto, descartada.

A análise do comportamento da equação dentro dos limites sugeridos, nos conduz a elaborar uma solução do tipo

$$u(\rho) = e^{-\rho} \rho^{l+1} G(\rho), \quad (72)$$

na qual o termo $G(\rho)$ ainda precisa ser determinado.

Aplicando esta forma geral na equação principal, teremos:

$$u'(\rho) = e^{-\rho} \rho^{l+2} G(\rho) + e^{-\rho} \rho^l (l+1) G(\rho) + e^{-\rho} \rho^{l+1} G'(\rho) \quad (73)$$

$$u''(\rho) = e^{-\rho} \rho^l \left\{ \rho G''(\rho) + 2G'(\rho)(l+1-\rho) + G(\rho) \left[\frac{l(l+1)}{\rho} + \rho - 2l - 2 \right] \right\} \quad (74)$$

$$\therefore \rho G''(\rho) + 2(l+1-\rho)G'(\rho) + (\rho_0 - 2l - 2)G(\rho) = 0. \quad (75)$$

Esta última apresenta uma forma de grande similaridade às assim chamadas equações de Laguerre. Estas funções especiais apresentam-se sob a forma

$$xL_k^{(\alpha)}(x) + (\alpha + 1 - x)L_k^{(\alpha)}(x) + kL_k^{(\alpha)}(x) = 0, \quad (76)$$

cujas soluções são os também conhecidos polinômios de Laguerre. Seguindo a ideia do método de solução em forma de série de potências, proporemos que:

$$G(\rho) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \rho^m, \quad (77)$$

$$\Rightarrow G'(\rho) = \sum_{m=1}^{\infty} m a_m \rho^{m-1} \text{ e } G''(\rho) = \sum_{m=2}^{\infty} m(m-1) a_m \rho^{m-2}.$$

Aplicando a solução proposta, segue que

$$\sum_{m=2}^{\infty} m(m-1) a_m \rho^{m-1} + (2l+2) \sum_{m=1}^{\infty} m a_m \rho^{m-1} - 2 \sum_{m=1}^{\infty} m a_m \rho^{m-1} + (\rho_0 - 2l - 2) \sum_{m=0}^{\infty} a_m \rho^m = 0$$

Tomemos a mudança de índice $j = m - 1$. Teremos:

$$\sum_{j=0}^{\infty} j(j+1) a_{j+1} \rho^j + (2l+2) \sum_{j=0}^{\infty} (j+1) a_{j+1} \rho^j - 2 \sum_{m=0}^{\infty} m a_m \rho^m + (\rho_0 - 2l - 2) \sum_{m=0}^{\infty} a_m \rho^m = 0$$

Como todos os somatórios começam de zero, colocamos todos sob a mesma notação:

$$\sum_{m=0}^{\infty} (2l+2+m)(m+1) a_{m+1} \rho^m + \sum_{m=0}^{\infty} (\rho_0 - 2l - 2 - 2m) a_m \rho^m = 0 \quad (78)$$

$$(2l+2+m)(m+1) a_{m+1} = [2(l+m+1) - \rho_0] a_m$$

$$a_{m+1} = \frac{[2(l+m+1) - \rho_0]}{(2l+2+m)(m+1)} a_m. \quad (79)$$

A condição de truncamento destas soluções requer que o máximo valor de m aconteça quando

$$2(l+m+1) = \rho_0 \quad (80)$$

$$\rho_0 = 2n. \quad (81)$$

Quando $n=0 \Rightarrow m_{m\acute{a}x} = -l-1$, não existindo, portanto, solução, uma vez que m não pode ser negativo.

Para $n=1 \Rightarrow m_{m\acute{a}x} = -l$. Como $l=0 \Rightarrow m_{m\acute{a}x} = 0$, e o polinômio é constante, equivalendo ao estado $1s$ da distribuição de Linus Pauling.

Para $n=2 \Rightarrow m_{m\acute{a}x} = 1-l$. Sendo que l pode assumir os valores $l=0$, ou $l=1$, isto implica dizer que $m_{m\acute{a}x} = 1$ (orbital s) ou $m_{m\acute{a}x} = 0$ (orbital p - $2s$; $2p$). Assim por diante.

Não tão logo, concluímos que as soluções para a função $G(\rho)$ consistem nos polinômios associados de Laguerre

$$G(\rho) = L_{-n-l-1}^{2l+1}\left(\frac{2r}{a_B n}\right), \quad (82)$$

onde cabe-nos notar que

$$\rho_0 = 2n = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2 E}}; \quad (83)$$

$$E_n = \frac{m}{2\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{1}{n^2} = \frac{E_R}{n^2}. \quad (84)$$

Além disso, sendo k o número de onda, segue que

$$k_n = \frac{1}{a_B n}, \text{ e} \quad (85)$$

$$\rho(r) = \frac{r}{a_B n}. \quad (86)$$

Todas estas considerações e resoluções nos conduzem à solução radial para a função de onda espacial do átomo de hidrogênio, segundo a forma:

$$R(r) = e^{-\frac{r}{a_B n}} \left(\frac{r}{a_B n}\right)^{l+1} L_{-n-l-1}^{2l+1}\left(\frac{2r}{a_B n}\right). \quad (87)$$

Diante do exposto, até o momento temos uma função de onda espacial descrita pela solução da ESIT escrita como

$$\Psi(r, \theta, \varphi) = e^{-\frac{r}{a_B n}} \left(\frac{r}{a_B n}\right)^{l+1} L_{-n-l-1}^{2l+1}\left(\frac{2r}{a_B n}\right) e^{im\varphi} \Theta(\theta). \quad (88)$$

Destarte nos concentraremos na descrição da solução polar para a citada equação. Retomemos o operador momento angular aplicado à parte angular da ESIT:

$$\hat{L}^2 F(\theta, \varphi) = \hbar^2 l(l+1) F(\theta, \varphi). \quad (89)$$

Reaplicando as definições previamente sugeridas, chegamos à seguinte equação:

$$\frac{1}{\sin\theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin\theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{\sin^2\theta} \right] \Theta = 0. \quad (90)$$

Assim como a equação que representa a dependência radial da função de onda espacial, a equação para a dependência polar também não é trivial. Proporemos aqui uma forma de solução que, ainda que apresente limitações, pode ser bastante elucidativa. Consideremos, primeiramente, as seguintes mudanças de variáveis:

$$x = \cos\theta, \quad (91)$$

$$y = \Theta(\arccos x). \quad (92)$$

Posto isto, prosseguiremos suas consequentes resoluções.

$$\frac{d}{d\theta} = \frac{d}{dx} \frac{dx}{d\theta} = -\sin\theta \frac{d}{dx} \quad (93)$$

$$(1-x^2) \frac{d^2 y}{dx^2} - 2x \frac{dy}{dx} + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{1-x^2} \right] y = 0. \quad (94)$$

Esta última apresenta uma grande similaridade com a conhecida equação de Legendre. Seja o caso $l=0 \Rightarrow m=0$. A solução para a dada equação, nestes termos, é $y = a_0$, uma constante. Se fizermos $l=1 \Rightarrow m=-1, 0, 1$ teremos três estados degenerados, dos quais, por simplicidade, escolheremos o estado $m=0$. Logo,

$$(1-x^2) \frac{d^2 y}{dx^2} - 2x \frac{dy}{dx} + 2y = 0. \quad (95)$$

Valendo-nos novamente do método de solução por séries de potências, propomos que

$$y = \sum_{m=0}^{\infty} a_m x^m, \quad (96)$$

o que nos conduz a

$$\sum_{m=2}^{\infty} m(m-1)a_m x^{m-2} - \sum_{m=2}^{\infty} m(m-1)a_m x^m - 2 \sum_{m=1}^{\infty} m a_m x^m + 2 \sum_{m=0}^{\infty} a_m x^m = 0. \quad (97)$$

Tomemos a mudança de índice $j = m - 2$:

$$\sum_{j=0}^{\infty} (j+2)(j+1)a_{j+2} x^j - \sum_{m=2}^{\infty} m(m-1)a_m x^m - 2a_1 x - 2 \sum_{m=2}^{\infty} m a_m x^m + 2a_0 + 2a_1 x + 2 \sum_{m=2}^{\infty} a_m x^m = 0$$

Coloquemos todos os somatórios a começarem de 2:

$$2a_0 + 2a_2 + 6a_3 x + \sum_{m=2}^{\infty} [(m+2)(m+1)a_{m+2} - m(m-1) - 2m+1] a_m x^m = 0. \quad (98)$$

$$\therefore a_3 = 0$$

$$a_2 = -\frac{a_0}{2}$$

$$a_4 = -\frac{5}{12} a_2$$

$$a_{m+2} = \frac{[m(m-1) + 2m - 1]}{(m+1)(m+2)} a_m. \quad (99)$$

$$\Rightarrow y(x) = a_0 \left(1 - \frac{x^2}{2} - \frac{5}{24} x^4 + \dots \right) \quad (100)$$

O termo entre parênteses na eq. (100) corresponde à expansão em série de MacLaurin de uma função $\arccos(x)$. Portanto, unindo a eq. (91) e eq. (100), conclui-se que:

$$\Theta(\theta) = a_0 \cos \theta \quad (101)$$

Estes resultados nos serão suficientes para entender que a solução polar da ESIT requer as formas dos polinômios de Legendre.

De modo geral, podemos escrever então a solução geral para o átomo de hidrogênio da seguinte maneira:

$$\Psi(r, \theta, \varphi, t) = \psi(r, \theta, \varphi) e^{-\frac{iEt}{\hbar}}, \quad (102)$$

onde

$$\psi(r, \theta, \varphi) = e^{-\frac{r}{a_B n}} \left(\frac{r}{a_B n} \right)^{l+1} L_{-n-l-1}^{2l+1} \left(\frac{2r}{a_B n} \right) F(\theta, \varphi), \quad (103)$$

e

$$F(\theta, \varphi) = e^{im\varphi} P_l^m(\theta). \quad (104)$$

$P_l^m(\theta)$, neste contexto, representam os polinômios associados de Legendre.

As soluções da equação de Schroedinger independente do tempo – ESIT, obtidas pelo método de separação de variáveis (em coordenadas esféricas, uma vez que o potencial não pode ser separado em termos envolvendo uma única coordenada cartesiana), nos conduz a números quânticos que nos permitem uma ideia sobre o tamanho e a forma do átomo:

n é o número quântico principal, associado ao tamanho e à energia do *orbital*;

l é o número quântico conhecido como momento angular orbital, que está associado à forma do átomo; este número dá uma medida de velocidade com a qual o elétron “circula” ao redor do núcleo;

m é o número quântico magnético, associado à orientação espacial do elétron;

Para o átomo de hidrogênio no estado fundamental ($n=1$), todos os orbitais possíveis têm o mesmo valor de energia – são degenerados; o momento angular orbital é zero ($l = 0$), bem como seu número magnético ($m = 0$), sugerindo uma órbita esférica. Entretanto seu número de spin apresenta valores que deixam clara a necessidade de um elétron a mais em sua última camada, para que a condição de estabilidade energética seja satisfeita: $s = \pm \frac{1}{2}$.

Para átomos multieletrônicos, este modelo continua válido, fazendo-se basicamente duas ressalvas:

- i) o número de prótons será diferente de 1 (um), o que modifica os valores de energia para os orbitais analisados.
- ii) Os elétrons ficam não mais sujeitos apenas ao potencial atrativo do núcleo, mas também ao potencial relativo às suas repulsões mútuas.

Toda esta análise foi procedida de maneira a que fosse mais bem entendido o comportamento de átomos hidrogenoides, suscitando argumentos plausíveis para a explicação da estabilidade química do hidrogênio, sua relação com átomos multieletrônicos (como o oxigênio, por exemplo), e suas conseqüentes propriedades.

O já citado caso do sódio também encontra explicação formal através do modelo de Schroedinger: A formação do dubleto, ilustrado na Figura 10, não seria possível, segundo o modelo de Bohr, por tratarem-se de duas transições distintas no mesmo nível de energia ($n = 3$). Entretanto, dado o acoplamento spin-órbita (Eq. 105), consideramos que, para este nível de energia, podemos ter $l = 0$, ou $l = 1$, acarretando valores $j = \frac{1}{2}$, e $j = \frac{3}{2}$, e, portanto, a formação de um dubleto.

$$j = l + s \quad (105)$$

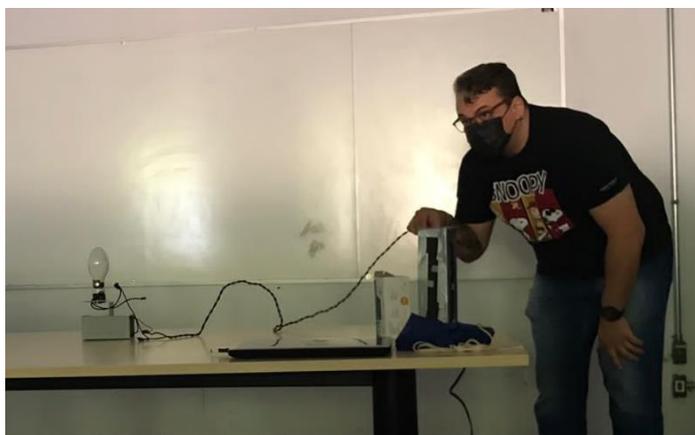
O modelo utilizado por Schroedinger para a solução do átomo de hidrogênio recobra os resultados de Bohr para a quantização da energia deste átomo, acrescentando a ele as soluções – não tão triviais – espaciais que nos fornecem a perspectiva de como é o comportamento deste átomo, bem como suas projeções para átomos multieletrônicos. A observância destes resultados traz luz aos comportamentos orbitais e algum “conforto” na explicação de fenômenos físicos macroscópicos resultantes de interações atômicas.

4 PRODUTO EDUCACIONAL

Este trabalho apresenta uma sugestão de produto educacional para o ensino de espectroscopia no ensino médio, que consiste na elaboração de um espectroscópio simplificado para observação do efeito de dispersão da luz proveniente de diferentes fontes, com a finalidade de verificar o espectro de absorção, ou de emissão, para posterior comparação com o espectro conhecido, já catalogado, dos elementos químicos existentes. Para esta comparação, e em complemento ao produto e fazendo parte dele, lançamos mão, ainda, de uma tabela periódica online, dotada de algumas informações sobre os elementos, além da figura de seu respectivo espectro de absorção.

O produto trata-se, parcialmente, de um espectroscópio caseiro, construído com materiais acessíveis (Figura 11), para observação do espectro de raias, seja de emissão ou de absorção, obtido a partir de fontes luminosas diferentes. O aparelho em questão fora construído tomando-se por base o vídeo do canal do MIT, no YouTube, intitulado “Lab 1: CD Spectrometer” (SUMMERS, *et al.* 2013). Compondo a totalidade deste produto, contamos ainda com uma tabela periódica virtual, construída em ambiente virtual de acesso livre (Figuras 12 e 13), em linguagem de programação “Javascript” e marcações em “HTML” e “CSS”; ambas as confecções sob orientação do Prof. Dr. Adellane Araujo Sousa, e, este último, coautoria do técnico em tecnologia da informação Israel Rodrigues Soares.

Figura 11 - Espectroscópio, reator e lâmpada de vapor de sódio.



Fonte: arquivo pessoal – 2022

Figura 12 - Página inicial da tabela periódica virtual.

Tabela periódica

Tabela por Israel Rodrigues e Franco Delfino. Inspirado na tabela periódica feita por Asif Ali Handil Khan

Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Figura 13 - Espectro de emissão do sódio.

Tabela periódica

11 Na Sódio

Sódio / sodium / é um elemento químico com símbolo na (do grego antigo νόδιον) e número atômico 11. É um metal macio, prateado e altamente reativo. Na tabela periódica, está na coluna 1 (metais alcalinos) e compartilha com os outros seis elementos nessa coluna que possui um único elétron em sua concha externa, que doa prontamente, criando um átomo carregado positivamente - um cátion.

Aparência
Metálico Branco Prateado

Descoberto por
Humphry Davy

Categoria
Metal Alcalino

Fase (CNTP)
Sólido

Massa Atômica (u)	Densidade (g/L)	Ponto de Ebulição (K)	Ponto de Fusão (K)
22.9898	0.9680	1156.0900	370.9440

Imagem espectral do elemento

Leia mais na [Wikipédia](#)

Fonte: arquivo pessoal – 2022.

O público visado são as terceiras séries do ensino médio, e tem como objetivo base a tentativa de uma abordagem mais elucidativa sobre algumas temáticas que se conversam, tais como óptica geométrica, ondulatória, energia, eletrostática e física moderna, constituintes comuns dos programas pedagógicos dos cursos do ensino básico regular.

Optamos pela utilização de materiais mais acessíveis, de menor custo, o quanto foi possível. Para a montagem do espectroscópio, os seguintes materiais foram usados:

- 1 (uma) peça de “foamcore” de cor preta;
- 1 (um) rolo de “silvertape”;
- 1 (um) rolo de fita adesiva;
- 1 (uma) régua milimetrada;
- 1 (um) pedaço de CD;
- 2 (duas) unidades de lâmina de barbear;
- 1 (um) estilete.

Lâmpadas especiais, como a de vapor de sódio (leia-se, especiais por tratarem-se de lâmpadas diferentes das comuns), necessitam de um reator para entrarem em funcionamento. Estes dois itens podem, comumente, ser encontrados em lojas de materiais elétricos, ou em lojas virtuais na internet. O custo médio destes materiais, atualmente, encontra-se em torno de R\$200,00, sendo que, deste valor, somente o reator e uma única lâmpada de vapor de sódio representam, em média, 75% (cerca de R\$150,00). Entretanto, é perfeitamente possível a utilização, apenas, do espectroscópio: o mesmo pode ser apontado para o Sol, o que gerará o padrão do espectro da luz visível, por exemplo. Também pode ser direcionado às lâmpadas fluorescentes, muitas vezes presentes nas salas de aula, ou para a lanterna de um celular.

A tabela periódica virtual, permanentemente no ar através da internet, pode acompanhar as observações feitas no espectroscópio, utilizada como método de investigação da composição da fonte luminosa, comparando-se os padrões de cores observados no espectroscópio, com os espectros de emissão mostrados nela (Figura 14).

Figura 14 - Espectro de emissão do mercúrio.

80 Hg Mercúrio

Mercúrio é um elemento químico com símbolo Hg e número atômico 80. É comumente conhecido como Quicksilver e foi chamado anteriormente Hydrargyrum (/ˈhaɪˈdrɪdʒrəəm/). Um elemento pesado e prateado do bloco D, o mercúrio é o único elemento metálico que é líquido em condições padrão para temperatura e pressão. O único outro elemento líquido nessas condições é o bromo, embora metais como césio, gálio e rubídio derretem logo acima da temperatura ambiente.

Aparência
Prateado

Descoberto por	Categoria	Fase (CNTF)
unknown, before 2000 BCE	Metal De Transição	Líquido

Massa Atômica (u)	Densidade (g/L)	Ponto de Ebulição (K)	Ponto de Fusão (K)
200.5923	13.5340	629.8800	234.3210

Imagem espectral do elemento

Fonte: arquivo pessoal – 2023.

Detalhes como a montagem do aparato experimental, descrição mais detalhada dos materiais utilizados na construção do mesmo, informações técnicas sobre a tabela periódica virtual – ainda que superficiais, e sugestões de elaboração de roteiro de aplicação em sala de aula, podem ser encontrados ao final deste trabalho (vide APÊNDICE).

5 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizamos uma abordagem semiquantitativa, por considerarmos a mais oportuna para a organização do procedimento experimental e obtenção de informações sobre o aprendizado dos estudantes. A abordagem semiquantitativa é a mais adequada para este trabalho, pois tem relação com a subjetividade individual dos sujeitos envolvidos (estudantes), em que o foco recai sobre o objeto de investigação do ponto de vista subjetivo dos indivíduos. A menção a uma descrição parcialmente qualitativa se justifica porque esta começa com pressupostos e uso de estruturas interpretativas, abordando os significados que os indivíduos atribuem a um problema investigado (CRESWELL, 2014).

5.1 VISÃO GERAL DA IMPLEMENTAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.

O presente trabalho foi dividido em quatro partes e aplicado entre os dias 01/07/2022 e 29/07/2022, nas turmas de terceiros anos do ensino médio integrado aos técnicos em alimentos, edificações, e química, do Instituto Federal de Goiás, campus Aparecida de Goiânia. No total, participaram deste projeto, 77 (setenta e sete) estudantes, sendo 30 (trinta) na turma de alimentos, 21 (vinte e um) na turma de edificações, e 26 (vinte e seis) na turma de química. Nossos encontros se deram de forma semanal, com duas aulas de 50 minutos cada, em sequência cada um, sempre às sextas-feiras, totalizando 400 minutos (6,6 h). A organização e distribuição do conteúdo a ser abordado deram-se por meio da apresentação do efeito a ser considerado, seguido de sua conceituação teórica e matemática; retomada da experimentação para novas observações, análise comparativa, conclusões e avaliação. Na sequência apresentamos como se deram estes encontros e quais foram as temáticas abordadas em cada um deles.

1º Encontro: apresentação da ideia inicial sobre espectroscopia e modelos atômicos.

Neste primeiro encontro apresentamos o material relativo ao projeto, oportunizando a observação da separação das cores através do

espectroscópio construído para este fim; alguns questionamentos foram levantados, tais como a determinação de componentes de uma amostra qualquer, fazendo alusão a filmografias conhecidas aos estudantes, como o seriado “CSI”, por exemplo. Transcorremos explicações sobre os modelos atômicos (exposição no quadro branco), focando na importância do modelo de Bohr para a explicação do vislumbre do espectro colorido que aparecia no aparelho em decorrência da passagem de luz.

2º Encontro: o modelo atômico de Bohr.

Na semana seguinte, tendo em vista as observações feitas no 1º encontro, ainda que bem embrionárias, procedemos a explicação sobre a teoria por trás do modelo atômico de Bohr e suas consequências para os estudos de espectroscopia. Este roteiro tomou todo o nosso tempo de exposição, tendo sido, todo ele, desenvolvido no quadro, em aula expositiva, dialogada, na qual os estudantes tinham permissão para interrupção e questionamento a qualquer tempo.

3º Encontro: espectroscopia para o ensino básico: experimentação.

Neste, o aparato experimental, incluindo a lâmpada de vapor de sódio, foi montado, ligado e apresentado para que os estudantes pudessem visualizar o padrão de cores formado a partir da luz proveniente da mesma. Chamamos a atenção para a ausência de algumas cores do espectro visível. Em seguida, propusemos a verificação do espectro de cores produzido por uma lâmpada fluorescente (que jazia na própria sala da aula), e de uma lâmpada de LED (diodo emissor de luz) de um celular. Por fim, os levei ao pátio do instituto para observarem o espectro de cores proveniente da luz do Sol.

4º Encontro: vídeo sobre o modelo de Bohr; retomada da experimentação e utilização da tabela periódica virtual.

No intuito de aprofundar a explicação procedida durante o 2º encontro e trazer mais clareza ao assunto, foi apresentado, no último encontro, um vídeo curto, de 10 minutos, explicativo e ilustrado sobre o modelo atômico de Bohr. Refizemos algumas observações com o espectroscópio, dos espectros fornecidos pela lâmpada de sódio, pela fluorescente, e pelo LED. Em seguida,

com o auxílio do projetor usado na mostra do vídeo, fora mostrada a imagem da tabela periódica virtual produzida neste trabalho, e suas funcionalidades. Foram observados o espectro formado pela luz de sódio, e pela lâmpada fluorescente, e comparados com o espectro mostrado na tabela. Em tempo, o link para acesso à mesma fora redirecionado para os estudantes, via moodle e whatsapp. A seguir, procedemos a aplicação do questionário (vide Apêndice A) como forma de verificação de aprendizagem, para o qual foi dado o interstício de uma semana para o recolhimento das respostas dos estudantes sobre a natureza da luz e dos efeitos observados.

5.1.1 QUADRO RESUMO SOBRE A METODOLOGIA APLICADA.

De forma resumida, para melhor vislumbre da construção do roteiro apresentado na seção 5.1, segue o quadro abaixo com a visão geral do mesmo:

Tabela 1 - Quadro resumo da metodologia utilizada.

Data do encontro:	Nº de aulas:	Momento pedagógico:	Tópico(s):	Recurso(s):
01/07/2022	02	1º	Apresentação do efeito espectroscópico.	Aula expositiva e dialogada, com proposição do tema e apresentação do espectroscópio e primeiros manuseios pelos estudantes.

08/07/2022	02	2º	Teoria física: o modelo atômico de Bohr.	Aula expositiva e dialogada, construída e apresentada no quadro branco.
22/07/2022	02	2º	Experimentação e análise de espectros de absorção.	Observação dos espectros de absorção formados pelas linhas espectrais de luzes emitidas por lâmpadas de vapor de sódio, fluorescentes, e led.
29/07/2022	02	3º	Reanálise dos modelos atômicos e estudo comparativo dos	Apresentação de vídeo curto e ilustrado sobre o modelo de Bohr; novas observações dos espectros de absorção e

			espectros observados.	comparação com os espectros já conhecidos, apresentados em tabela periódica virtual deste trabalho.
--	--	--	-----------------------	---

Fonte: o autor – 2022.

Por ser um produto educacional, este trabalho é de natureza aplicada, pois gera conhecimento para a aplicação de práticas dirigidas à solução de problemas, possibilitando estudantes do ensino médio ter conhecimento mínimo sobre Física Moderna e Contemporânea, como cita a BNCC:

“(…) no Ensino Médio, diversificam-se as situações-problema, referidas nas competências específicas e nas habilidades, incluindo-se aquelas que permitem a aplicação de modelos com maior nível de abstração e que buscam explicar, analisar e prever os efeitos das interações e relações entre matéria e energia (por exemplo, (...) o comportamento dos elétrons frente à absorção de energia luminosa (...))”.

Como ferramentas de avaliação, utilizamos a participação dos estudantes em sala de aula, motivação para compreender os fenômenos estudados e um questionário ao final da quarta aula, com perguntas abertas (ver Apêndice A). Neste momento os estudantes tiveram a oportunidade de apresentar os principais conceitos aprendidos nas aulas teóricas em sala e no desenvolvimento das práticas experimentais. O uso de um questionário com perguntas abertas é necessário quando não se conhecem todas as possíveis respostas de uma pergunta, a subjetividade nas possíveis respostas, não se preocupa em sugerir respostas, ou quando o objetiva-se coletar respostas próprias dos estudantes (GUNTHER; LOPES JÚNIOR, 2012).

6 APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

Após a proposição do tema, em todas as turmas, o aparato experimental foi apresentado (Figura 15), de acordo com o descrito no capítulo de metodologia, no primeiro encontro. Em geral, os estudantes demonstravam bastante curiosidade a respeito do que estava por vir.

Figura 15 - Apresentação do aparato experimental.



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

O efeito que havia sido mencionado foi mostrado, qual seja a formação de espectros de raios dos elementos químicos, utilizando fontes de luz diferentes. A primeira foi a lâmpada da própria sala de aula, seguida pela lâmpada de vapor de sódio que se vê nas figuras 16, 17 e 18. Uma mistura de fascínio e temor parecia tomar conta da atmosfera das salas enquanto a lâmpada de vapor de sódio se aquecia e emitia luz, que inicialmente é branca, e tende, rapidamente, a um forte tom de amarelo. Organizados em fila, tiveram, individualmente a oportunidade de observar a formação do espectro de emissão do sódio, que, mesmo de maneira rudimentar, provocava reações positivas, e de surpresa, além de questionamentos sobre o fenômeno e assuntos correlatos.

Figura 16 - Funcionamento da lâmpada de sódio.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Figura 17 - Participação dos estudantes na observação do espectro de raios da lâmpada de sódio.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Figura 18 - Interação dos estudantes com o experimento.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Em seguida, os estudantes foram convidados a participar de uma rápida volta pelo campus, a fim de procederem, também, observações do espectro emitido pelo Sol (Figura 19), além de quaisquer outras fontes que assim os interessassem. Neste momento tiveram toda a liberdade para procurar outras fontes emissoras de luz, ou mesmo refletora, para observarem as possíveis diferenças entre os espectros formados. Chegaram a fazer experimentações com a luz do celular, pintando-a com canetões de cores diferentes para verificar a produção de alterações. Deveras, o padrão espectral solar chamou muito a atenção deles, mormente porque parecia totalmente completo, e era bem mais intenso e definido.

Figura 19 - Observação do espectro solar.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Ainda fora da sala de aula, foi abordada, brevemente, a temática histórica envolvida no transcorrer daquelas observações (Newton, Fraunhofer, e Bunsen, basicamente) em consonância com a supervisão das experimentações que os estudantes faziam (Figura 20). Assim sendo, discussões e questionamentos foram levantados e conversados durante o fechamento deste encontro, como se vê na figura 21.

Figura 20 - Supervisão das observações dos estudantes.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Figura 21 - Discussões, perspectivas e questionamentos dos estudantes.



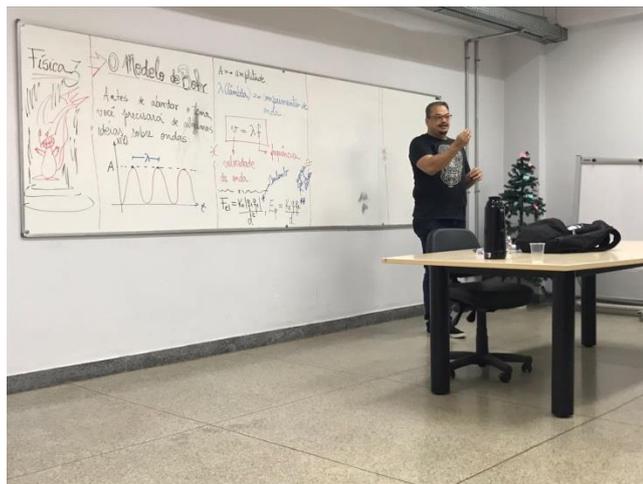
Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Em geral os estudantes pareciam bastante instigados pela temática, solicitando novas observações em diferentes fontes de luz, após a aula.

Nosso encontro subsequente, o segundo, de acordo com a tabela 1, aconteceu todo dentro de sala de aula, com a apresentação dos modelos atômicos clássicos, e a inserção da modelagem e da quantização proposta para o átomo de Bohr (Figura 22). Esta abordagem foi, ao menos em tentativa,

toda direcionada para o nível de instrução ao qual os estudantes faziam jus até aquele momento. Tal procedimento nos tomou todo o tempo disponível naquela feita.

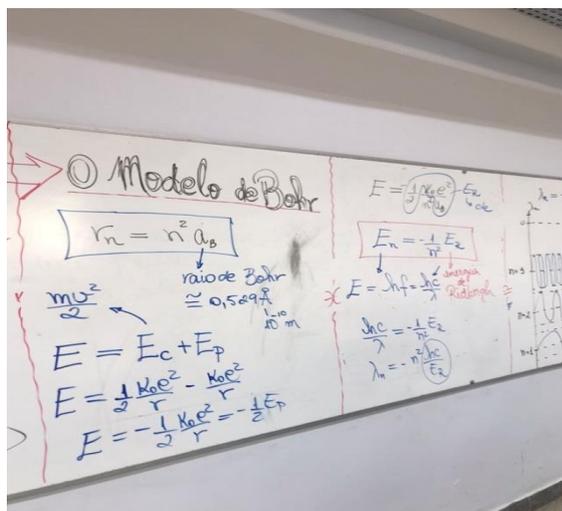
Figura 22 - Exposição dos conceitos físicos e matemáticos do modelo de Bohr.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Este foi o momento de maior tensão durante a aplicação deste produto. Parte do público, ainda que pequena, se desinteressou muito rapidamente sobre o que estava sendo exposto. Uma segunda parcela posicionava-se de maneira muito interessada, vislumbrava os artifícios matemáticos (Figura 23) em concórdia com a argumentação apresentada, mesmo que, segundo alguns, tudo parecesse mais complexo do que se supunha, “fazia muito sentido”.

Figura 23 - Quadro parcial da explicação sobre o modelo de Bohr.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

Ainda que encontrassem alguns percalços no que tange à matemática envolvida, a atenção da maioria dos estudantes foi mantida, principalmente quando o transcorrer do assunto envolvia termos como “quantização”. Havia, segundo os mesmos, o que alguns chamaram de “ignorância” sobre o tema.

Ainda assim, segundo as reações gerais do público que assistiu a este encontro, numa das turmas, o mesmo se demonstrou um tanto cansativo e causou reações de perplexidade em uma grande parcela do alunato. Ao final, um dos estudantes relatou: “Faz sentido, mas não entendo bem”, concluiu.

No entanto, nas outras duas turmas onde o mesmo tema foi tomado em exposição, tiveram reações mais positivas: validaram as análises e demonstrações feitas em aula; contribuíram ao final dizendo que o tema abria várias discussões, e demonstraram muito entusiasmo com aquela abordagem. Um dos estudantes, após a aula, afirmou: “Ajuda a entender métodos instrumentais de análise, como ‘FTIR’ e ‘DR-X’”, citou.

No terceiro momento pedagógico (vide Tabela 1), houve a retomada das discussões sobre os resultados obtidos com o modelo atômico de Bohr, acrescida pela apresentação do vídeo do canal Ciência Todo Dia, do Youtube, intitulado “O átomo de Bohr explicado” (Figura 24).

Figura 24 - Apresentação do vídeo explicativo sobre o átomo de Bohr.



Fonte: arquivo pessoal – 2022.

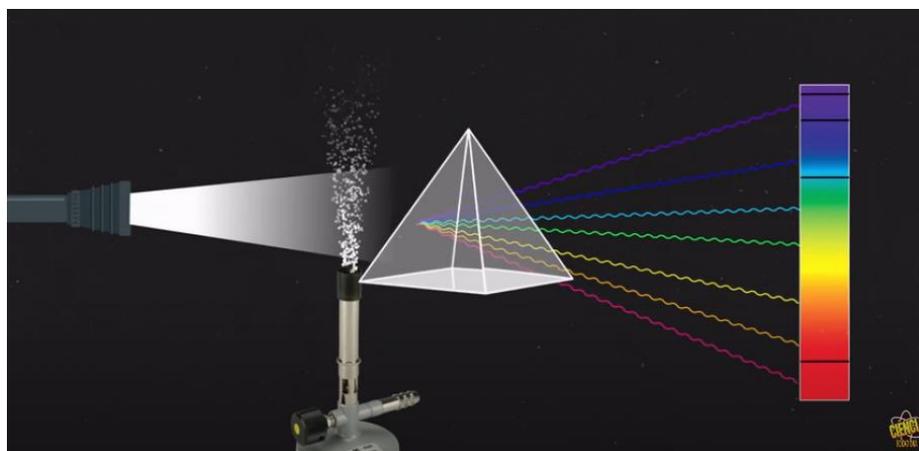
O vídeo em questão traz em perspectiva histórica e com imagens bastante interessantes, a construção do modelo de Bohr e como ele mudava a perspectiva da Física da época. A inserção de imagens esteticamente mais elaboradas (Figuras 25 e 26), e a apresentação mais descompromissada, matematicamente falando, proposta pelo vídeo, foram de grande auxílio na elucidação do tema tratado no encontro anterior. A alegação de que aquele modelo havia ficado mais claro, foi comum às turmas.

Figura 25 - Extrato do vídeo sobre o átomo de Bohr evidenciando diferentes cores de chama para elementos químicos distintos.



Fonte: “O átomo de Bohr explicado” (canal Ciência todo dia – YouTube).

Figura 26 - Extrato do vídeo sobre o átomo de Bohr simbolizando a formação do espectro de absorção dos elementos.



Fonte: “O átomo de Bohr explicado” (canal Ciência todo dia – YouTube).

Nesta etapa os estudantes demonstraram-se muito interessados e levantavam várias questões envolvendo as transições de estado e o modelo atômico proposto por Bohr, além de também evoluírem a argumentação para a discussão a respeito da composição de corpos celestes, tais como estrelas, cometas, planetas e exoplanetas. Houve, também, algumas filmagens e

fotografias, produzidas pelos próprios estudantes, feitas a partir dos espectros de absorção observados.

A seguir, repetimos algumas de nossas primeiras experimentações utilizando o espectroscópio proposto, e comparamos os espectros observados com os apresentados na tabela periódica deste trabalho (Figura 27), disposta no sítio <https://raelis.github.io/tabela-periodica/>.

Figura 27 - Tabela periódica associada ao produto educacional.

The image shows a periodic table of elements with a dark blue background. The elements are arranged in their standard periodic layout, including the lanthanide and actinide series at the bottom. The table is titled 'Tabela periódica' at the top left. The elements are color-coded: Hydrogen (H) is purple, Helium (He) is pink, Lithium (Li) is orange, Beryllium (Be) is yellow, Boron (B) is green, Carbon (C) is blue, Nitrogen (N) is purple, Oxygen (O) is red, Fluorine (F) is yellow, Neon (Ne) is pink, Sodium (Na) is orange, Magnesium (Mg) is yellow, Aluminum (Al) is green, Silicon (Si) is blue, Phosphorus (P) is purple, Sulfur (S) is red, Chlorine (Cl) is yellow, Argon (Ar) is pink, Potassium (K) is orange, Calcium (Ca) is yellow, Scandium (Sc) is green, Titanium (Ti) is blue, Vanadium (V) is purple, Chromium (Cr) is red, Manganese (Mn) is yellow, Iron (Fe) is orange, Cobalt (Co) is yellow, Nickel (Ni) is orange, Copper (Cu) is yellow, Zinc (Zn) is yellow, Gallium (Ga) is green, Germanium (Ge) is blue, Arsenic (As) is purple, Selenium (Se) is red, Bromine (Br) is yellow, Krypton (Kr) is pink, Rubidium (Rb) is orange, Strontium (Sr) is yellow, Yttrium (Y) is green, Zirconium (Zr) is blue, Niobium (Nb) is purple, Molybdenum (Mo) is red, Technetium (Tc) is yellow, Ruthenium (Ru) is orange, Rhodium (Rh) is yellow, Palladium (Pd) is orange, Silver (Ag) is yellow, Cadmium (Cd) is yellow, Indium (In) is green, Tin (Sn) is blue, Antimony (Sb) is purple, Tellurium (Te) is red, Iodine (I) is yellow, Xenon (Xe) is pink, Cesium (Cs) is orange, Barium (Ba) is yellow, Hafnium (Hf) is green, Tantalum (Ta) is blue, Tungsten (W) is purple, Rhenium (Re) is red, Osmium (Os) is yellow, Iridium (Ir) is orange, Platinum (Pt) is yellow, Gold (Au) is yellow, Mercury (Hg) is yellow, Thallium (Tl) is green, Lead (Pb) is blue, Bismuth (Bi) is purple, Polonium (Po) is red, Astatine (At) is yellow, Radon (Rn) is pink, Francium (Fr) is orange, Radium (Ra) is yellow, Rutherfordium (Rf) is green, Dubnium (Db) is blue, Seaborgium (Sg) is purple, Bohrium (Bh) is red, Hassium (Hs) is yellow, Meitnerium (Mt) is orange, Darmstadtium (Ds) is yellow, Roentgenium (Rg) is yellow, Copernicium (Cn) is yellow, Nihonium (Nh) is green, Flerovium (Fl) is blue, Moscovium (Mc) is purple, Livermorium (Lv) is red, Tennessine (Ts) is yellow, Oganesson (Og) is pink, Lanthanum (La) is orange, Cerium (Ce) is yellow, Praseodymium (Pr) is green, Neodymium (Nd) is blue, Promethium (Pm) is purple, Samarium (Sm) is red, Europium (Eu) is orange, Gadolinium (Gd) is yellow, Terbium (Tb) is green, Dysprosium (Dy) is blue, Holmium (Ho) is purple, Erbium (Er) is red, Thulium (Tm) is orange, Ytterbium (Yb) is yellow, Lutetium (Lu) is green, Actinium (Ac) is orange, Thorium (Th) is yellow, Protactinium (Pa) is green, Uranium (U) is blue, Neptunium (Np) is purple, Plutonium (Pu) is red, Americium (Am) is orange, Curium (Cm) is yellow, Berkelium (Bk) is green, Californium (Cf) is blue, Einsteinium (Es) is purple, Fermium (Fm) is red, Mendelevium (Md) is orange, Nobelium (No) is yellow, and Lawrencium (Lr) is green.

Fonte: o autor – 2022.

Aqui tivemos uma oportunidade de compararmos os padrões de interferência formados em nosso espectroscópio, com o que já havia sido tabelado dentre os conhecidos elementos químicos. Os estudantes acessaram a tabela periódica virtual deste trabalho, através de seus celulares, por meio do link que lhes fora enviado. Alguns refizeram observações no próprio espectroscópio para comparação, enquanto outros haviam fotografado as imagens antes, e assim as comparavam.

Depois de todo este trâmite, seguimos com a proposta de aplicação de questionário teórico (Apêndice A) sobre o tema abordado, como método de avaliação, tanto de aprendizagem, como da validade desta aplicação numa rotina regular de sala de aula. O questionário foi disponibilizado via sistema “moodle”, institucional, atribuindo-se, para esta atividade, o prazo de uma semana para sua execução. O prazo seria justificado devido à limitação de horários semanais decorrentes das várias demandas da instituição, em relação

às atividades de ensino. Deste modo, fora solicitado aos estudantes que respondessem ao questionário de acordo com o que havia sido disposto aos mesmos, durante a aplicação deste produto em sala.

7 RESULTADOS

Finalizadas as inserções em sala de aula, foi proposto um questionário aberto com 10 (dez) perguntas sobre a temática desenvolvida (Apêndice C). Todas as turmas de terceiros anos do ensino médio integrado aos cursos técnicos em alimentos, edificações e química do IFG, campus Aparecida de Goiânia, tiveram prazo equivalente a uma semana, a contar do último dia de aplicação do produto educacional, para respondê-lo.

As respostas dos estudantes foram separadas, para melhor análise, em três grupos de categorias, a saber:

Grupo 1: respostas satisfatórias; mencionam e/ou correlacionam conceitos físicos adequadamente.

Grupo 2: respostas parcialmente satisfatórias; mencionam e/ou correlacionam conceitos físicos de maneira desconexa.

Grupo 3: respostas insatisfatórias; não há menção de conceitos físicos ou não responderam.

Seguindo este certame, encontramos o seguinte cenário para as questões mencionadas:

Questão 01: *Você deve ter observado que o arco-íris, um fenômeno que costuma acontecer em dias de chuvas, apresenta uma série de cores diferentes. Podemos ver o arco-íris em dias sem chuva? Em que lugares?*

Esta questão pretendia verificar as prováveis e potenciais observações iniciais dos estudantes sobre a temática que seria abordada e desenvolvida. Das três turmas analisadas, 16 (dezesesseis) estudantes não responderam, de um total de 77 (setenta e sete) estudantes. Portanto, tendo em vista apenas as respostas válidas, apenas 2 (duas) das respostas foram consideradas insatisfatórias. 27 (vinte e sete) respostas foram consideradas satisfatórias, mas com menções equivocadas ou não correlacionadas dos conceitos físicos – 35,1% (grupo 2) do espaço amostral, e 32 (trinta e duas) respostas condizentes – 41,6% (grupo 1). Estes resultados constam na tabela 1, separada por turmas, e também no gráfico 1, no qual temos uma perspectiva geral das quantidades e percentuais das respostas em relação aos grupos categorizados.

Tabela 2 - Respostas à questão 01, separadas por grupos e turmas.

Questão 01			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	12	9	11
Grupo 2	11	6	10
Grupo 3	7	6	5

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 01: Alimentos, Edificações e Química.

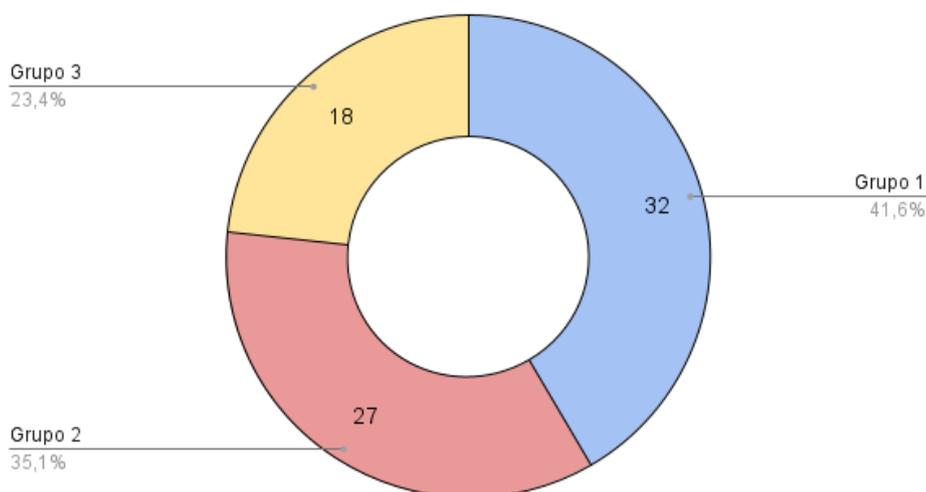


Gráfico 1: Quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 01.

Fonte: o autor – 2022.

Abaixo, seguem dois exemplos de respostas dos estudantes:

“Sim, podemos. Bastam algumas gotículas de água e a luz corretamente posicionada que o arco-íris se formará. Não precisa estar chovendo. Além disso, podemos vê-lo em objetos como um CD, ou na tela de um celular (apagada).”

“Um arco-íris independe de um dia chuvoso. Podemos visualizá-los em cursos d’água, a depender da direção de seu curso e da incidência da luz, ou ainda em algumas superfícies sólidas, como a que compõe os discos compactos (CDs).”

Questão 02: *De que é feito o arco-íris? Como ele é produzido?*

A questão 02 dava abertura para o levantamento de hipóteses sobre a formação do arco-íris. Nela, podemos observar que, para além das 16 (dezesesseis) abstenções, tivemos ainda 8 (oito) respostas insatisfatórias. Como se vê na tabela 2, dos grupos categorizados, separados por turma, 28 (vinte e oito) estudantes – 36,4% do total, constam no grupo 2, e 25 (vinte e cinco) – 32,5%, no grupo 01.

O gráfico 2 apresenta os resultados gerais para esta questão.

Tabela 3 - Respostas à questão 02, separadas por grupos e turmas.

Questão 02			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	13	7	5
Grupo 2	9	5	14
Grupo 3	8	9	7

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 02: Alimentos, Edificações e Química.

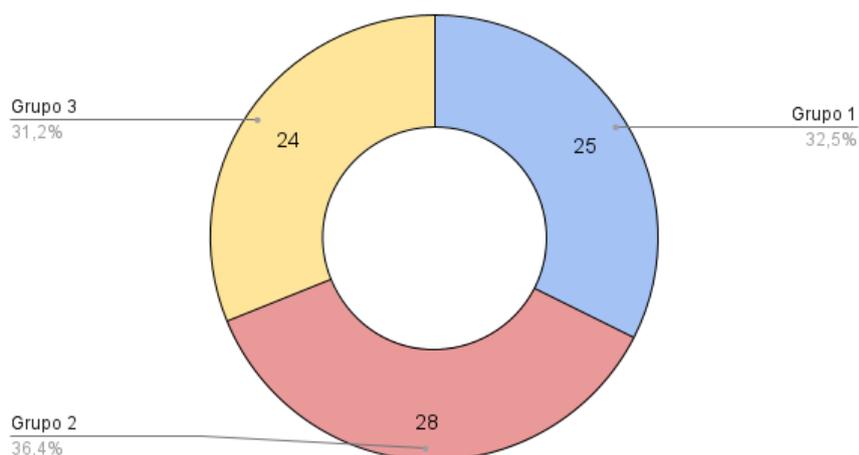


Gráfico 2: Quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 02.

Fonte: o autor – 2022.

Algumas das respostas são apresentadas a seguir:

“O arco-íris é feito a partir da refração ou difração da luz. ”

“O arco-íris é um fenômeno formado a partir da ação da luz branca, que resulta em várias cores. A separação dessas cores acontece em gotículas de água, como na chuva, por exemplo. ”

Questão 03: *Esse padrão de arco-íris está associado com a luz branca? Um LED pode produzir o arco-íris?*

A questão 03, novamente, trata da formulação de hipóteses e apresenta uma problematização. Nela, 14 (catorze) respostas podem ser consideradas inadequadas, as quais somadas às 16 (dezesesseis) abstenções, figuram os 38,5% de respostas no grupo 3, mostradas no gráfico 3. Esta questão suscitou, aparentemente, muitas interpretações por parte dos estudantes, o que levantou diferentes hipóteses para a mesma. 22 (vinte e duas) das respostas se encaixaram no grupo 1 – 28,2%, e 26 (vinte e seis) no grupo 2 – 33,3%.

Tabela 4 - Respostas à questão 03, separadas por grupos e turmas.

Questão 03			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	7	10	5
Grupo 2	10	6	10
Grupo 3	13	6	11

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 03: Alimentos, Edificações e Química.

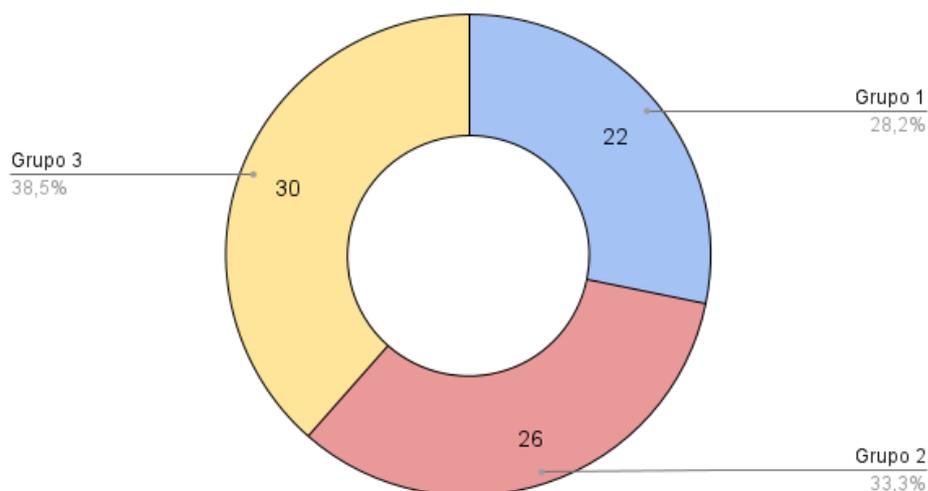


Gráfico 3: Quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 03.

Fonte: o autor – 2022.

Como exemplo, seguem duas respostas obtidas para a questão:

“O arco-íris está associado à luz branca, entretanto, com a ‘participação’ de outro componente. Neste contexto, um LED, sozinho, não pode produzir um arco-íris. Para isso é necessário um prisma para que a luz branca do LED possa se separar, formando assim o arco-íris. ”

“Está totalmente associado à luz branca, já que a mesma é a junção de todas as cores, e, portanto, pode se dividir entre elas. Sim, uma luz branca de LED pode sim formar um arco-íris. ”

Questão 04: *Um gás pode emitir luz? Um líquido pode emitir luz? E um sólido? Um átomo ou molécula pode emitir luz? Quais são os objetos ou substâncias que você conhece que emitem luz e em que circunstâncias? Será possível enxergar um arco-íris associados a estes objetos ou substâncias?*

Esta questão tem a pretensão de verificar a associação entre o efeito espectroscópico abordado no produto educacional deste trabalho e as possíveis observações dos estudantes, de maneira a hipotetizar e teorizar mais sobre o assunto. Nela, 11 (onze) respostas foram consideradas inadequadas (grupo 3), que em conjunto às 16 (dezesesseis) abstenções, compuseram os 36,5% apresentados no gráfico 4. A maioria das respostas constam do grupo 1, 43,2% - 32 (trinta e duas) respostas, tendo ainda 20,3% - 15 (quinze) respostas

constantes do grupo 2. Os referidos dados são apresentados separados por grupo e turma na tabela 4, e os percentuais gerais no gráfico 4.

Tabela 5 - Respostas à questão 04, separadas por grupos e turmas.

Questão 04			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	14	11	7
Grupo 2	3	4	8
Grupo 3	13	6	8

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 04: Alimentos, Edificações e Química.

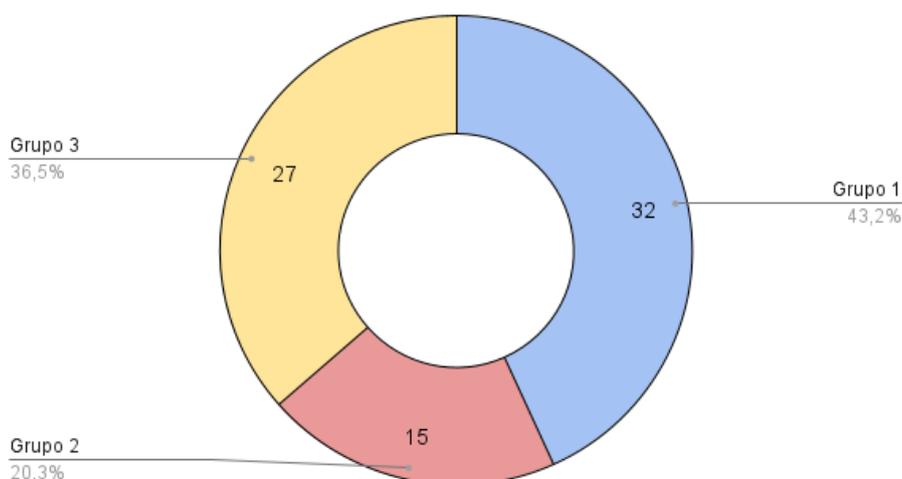


Gráfico 4: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 04.

Fonte: o autor – 2022.

Algumas das respostas obtidas podem ser vistas a seguir:

“Sim, todos os objetos e substâncias acima podem emitir luz. Conheço lâmpada quando acesa, vela, o Sol, que emite luz o tempo todo. Sim, é possível enxergar um arco-íris nestes objetos, mas não só com eles. Por exemplo, com a luz do Sol é necessário se ter também pelo menos gotículas de água no ambiente. ”

“Um gás ou um sólido, e, de modo geral, um átomo ou molécula podem emitir luz, desde que devidamente excitados para que, deste modo, quando os elétrons voltem para o estado fundamental, emitam energia em forma de luz (fótons). Uma lâmpada emite luz quando devidamente energizada, o cloreto de sódio quando jogado em uma chama; velas, enquanto houver material para manter a combustão, etc. Acredito ser possível que estes corpos produzam um arco-íris, porém não será semelhante ao gerado pela luz ambiente em um dia ensolarado.”

Questão 05: *Por falar em luz, de que é feita a luz? Ela é líquida, gasosa, sólida ou o quê?*

A questão 05 aborda a temática da “composição” da luz. Nela observamos o levantamento de hipóteses sobre os estados da matéria e o enquadramento da luz enquanto fenômeno físico, dentro destas características. Dentre as respostas do grupo 3, 10 (dez) foram consideradas inadequadas, que em conjunto às 16 (dezesesseis) abstenções, formam os 33,8% apresentados no gráfico 5. Do restante das respostas, 36,4% constam do grupo 1 – 28 (vinte e oito) respostas, e 29,9% - 23 (vinte e três) respostas no grupo 2. Os referidos dados são apresentados por grupo de respostas e turma na tabela 5, e no gráfico 5, de modo geral.

Tabela 6 - Respostas à questão 05, separadas por grupos e turmas.

Questão 05			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	9	11	8
Grupo 2	8	3	12
Grupo 3	13	7	6

Fonte: o autor - 2022.

QUESTÃO 05: Alimentos, Edificações e Química.

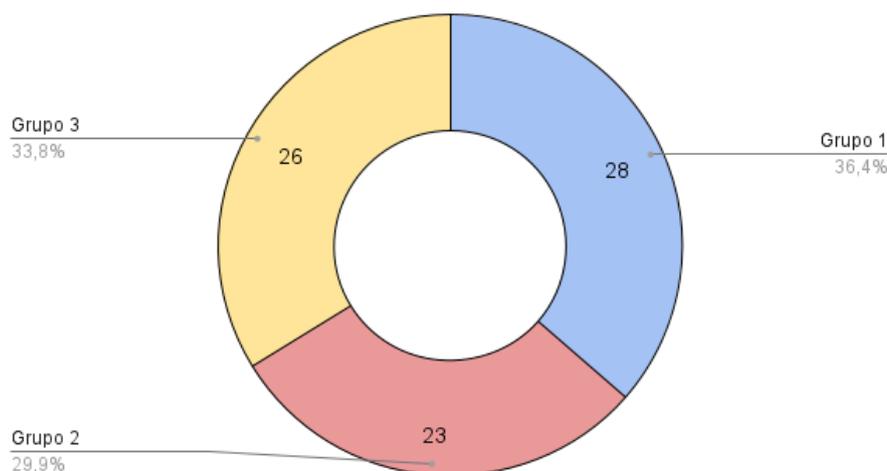


Gráfico 5: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 05.

Fonte: o autor – 2022.

Algumas das respostas mais adequadas são mostradas a seguir:

“A luz não é composta de matéria, embora interaja com ela. Atribui-se a elas partículas chamadas ‘fótons’, que atuam não só no campo elétrico, mas também no magnético. ”

“A luz não é líquida, gasosa e nem sólida, uma vez que ela não é classificada como matéria. Ela é um tipo de radiação eletromagnética que se propaga em forma de onda e é captada pelos olhos humanos. ”

Questão 06: *Será que tem como eu “medir” a luz de alguma maneira? Ou melhor, a luz tem algo mensurável?*

Depois de teorizarmos sobre a natureza da luz (questão 05), a questão 06 traz um problema de medição. Nela observamos o que os estudantes sabem ou hipotetizam sobre as variáveis mensuráveis da luz. Aqui tivemos um índice elevado de respostas insatisfatórias: além das já conhecidas 16 (dezesesseis) abstenções, 22 (vinte e duas) respostas ajudam a compor os 49,4% de respostas do grupo 3, como vemos no gráfico 6. Entretanto, o somatório de respostas adequadas ainda se sobrepõe: 35,1% - 27 (vinte e sete) respostas – no grupo 1, e 15,6% - 12 (doze) respostas – no grupo 2, totalizando 50,7% das respostas. Os dados são apresentados separados por grupo e por turma na tabela 6, e em perspectiva geral, por grupo, no gráfico 6.

Tabela 7 - Respostas à questão 06, separadas por grupos e turmas.

Questão 06			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	8	11	8
Grupo 2	5	2	5
Grupo 3	17	8	13

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 06: Alimentos, Edificações e Química.

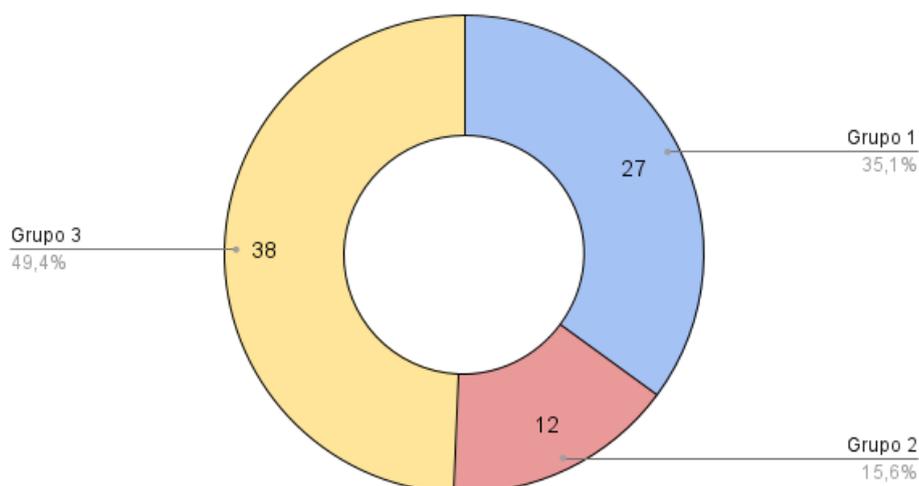


Gráfico 6: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 06.

Fonte: o autor – 2022.

Algumas das respostas satisfatórias são apresentadas a seguir:

“Podemos medir o comprimento de onda da luz, a partir do qual se classifica, inclusive, a faixa de comprimento de onda visível do espectro eletromagnético.”

“Podemos citar a velocidade da luz, que ajuda a determinar outras características como comprimento de onda e frequência.”

Questão 07: *Por que existem cores diferentes?*

A questão 07 pretende associar as variáveis mensuráveis da luz – como a frequência – com seus consequentes efeitos visuais. Para ela obtivemos 13 (treze) respostas consideradas insatisfatórias que, acrescidas às 16 (dezesesseis) abstenções, geraram o percentual geral de 37,7% das respostas associadas ao grupo 3. 28 (vinte e oito) respostas – 36,4% constam do grupo 1, e 20 (vinte) – 26,0% figuram no grupo 2. Estes dados são apresentados na tabela 7, por turma e grupo de respostas, e no gráfico 7, de forma geral, por grupos de respostas.

Tabela 8 - Respostas à questão 07, separadas por grupos e turmas.

Questão 07			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	10	9	9
Grupo 2	8	4	8
Grupo 3	12	8	9

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 07: Alimentos, Edificações e Química.

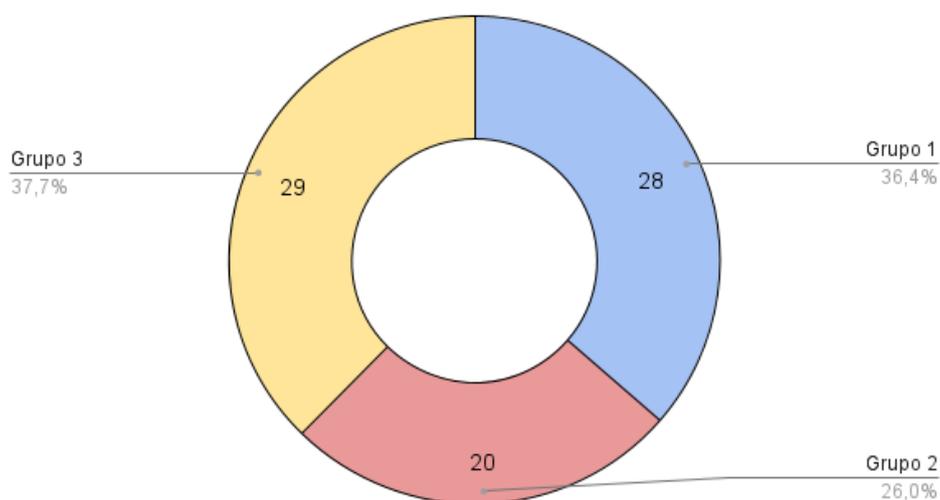


Gráfico 7: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 07.

Fonte: o autor – 2022.

Apresentamos a seguir algumas das respostas condizentes:

“As cores variam em função de quais comprimentos de onda determinado composto absorve. Através de técnicas como a espectroscopia UV-vis é possível determinar os picos e a faixa de absorção de um material em análise.”

“Porque existem comprimentos de onda diferentes, e cada um deles, dentro do espectro de luz visível, é representado pelo nosso cérebro como uma cor diferente.”

Questão 08: *O que tem de especial nas lâmpadas de cores diferentes, como as lâmpadas de neon, usadas em propagandas comerciais nos outdoors?*

Esta questão abordava temáticas aplicadas e tratadas na apresentação do produto educacional, tais como óptica elementar, física moderna – modelo atômico de Bohr, e química básica, relacionando-as a uma de suas conhecidas consequências tecnológicas. Do percentual de respostas classificadas como grupo 3 – 42,9%, 16 foram abstenções, e 17 respostas foram consideradas insatisfatórias. Seguimos com 25 respostas (32,5%) no grupo 1, e 19 (24,7%) das respostas no grupo 2. Os dados separados por turma e por grupo de respostas constam na tabela 8, e de modo geral, por grupo, no gráfico 8.

Tabela 9 - Respostas à questão 08, separadas por grupos e turmas.

Questão 08			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	7	8	10
Grupo 2	8	6	5
Grupo 3	15	7	11

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 08: Alimentos, Edificações e Química.

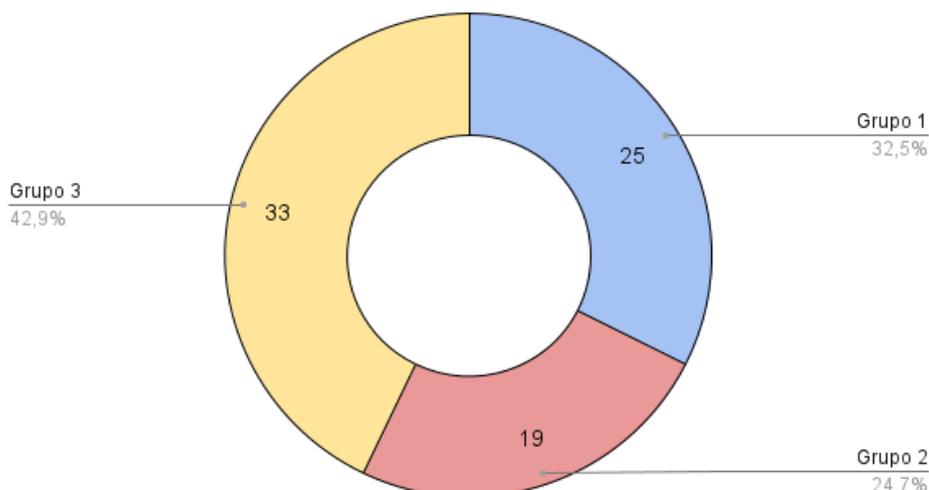


Gráfico 8: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 08.

Fonte: o autor – 2022.

Duas das respostas consideradas satisfatórias são apresentadas na sequência:

“A luz é emitida do gás Neon e é semelhante à das lâmpadas fluorescentes. Ali ocorre que os elétrons presentes são excitados, e quando retornam à sua órbita original, emitem luz, que só é transmitida enquanto há fornecimento de energia. ”

“A composição dessas lâmpadas pode ser responsável por suas características singulares, isto é, o material utilizado em seu anodo ou catodo, ou ainda, se possuir, o gás contido em seu interior. ”

Questão 09: *Por que aparece o arco-íris em um CD-rom?*

A questão 09 centrava-se em uma das características fenomenológicas ondulatórias da luz: a difração. Funcionando como uma rede de difração simplificada, devido às microrranhuras presentes no CD, o mesmo consegue mostrar um “padrão de arco-íris” através da separação angular das frequências visíveis componentes da luz “branca”. Nesta questão, novamente tivemos um alto índice de respostas insatisfatórias: 20 respostas, que somadas às 16 abstenções, compuseram o quadro de 46,8% de respostas constantes do grupo 3 (gráfico 9). Ainda assim, o total de respostas satisfatórias permanece

superior: 53,3% (aproximadamente), dos quais 24,7% (19 respostas) figuram no grupo 1, e 28,6% (22 respostas) no grupo 2. Estes dados são apresentados na tabela 9, com números separados por turma e grupo de respostas, e no gráfico 9, em percentuais gerais por grupo.

Tabela 10 - Respostas à questão 09, separadas por grupos e turmas.

Questão 09			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	5	9	5
Grupo 2	10	6	6
Grupo 3	15	6	15

Fonte: o autor – 2022.

QUESTÃO 09: Alimentos, Edificações e Química.

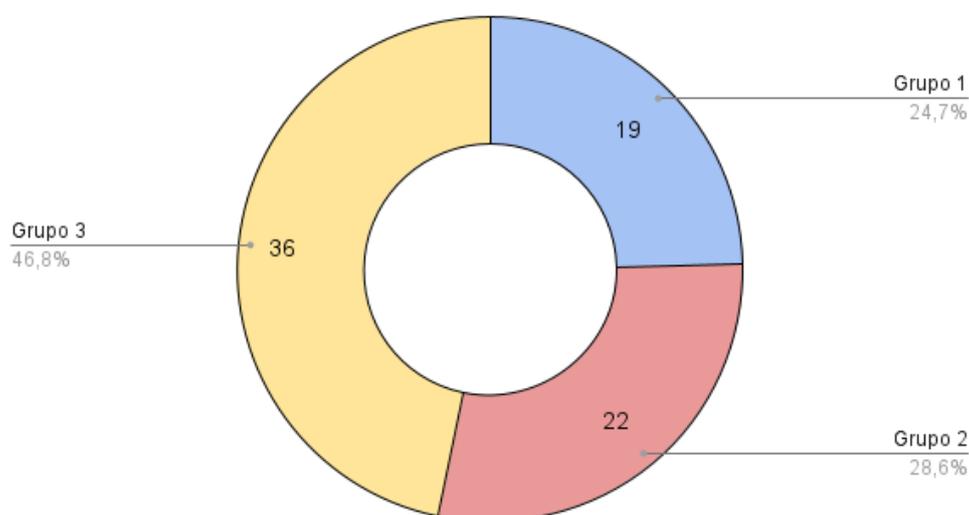


Gráfico 9: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 09.

Fonte: o autor – 2022.

Dentre as respostas plausíveis, destacamos duas, a seguir:

“Isso ocorre, pois a luz, ao se encontrar com a superfície do CD, é difratada, isto é, é como se ela fosse redirecionada em direções diversas de modo a gerar esse padrão. ”

“Um CD é composto de milhares de poços dispostos na forma de faixas em espiral. Quando a luz visível incide sobre eles, difrata em todas as direções. O CD atua como grade de difração, assim formando as cores do arco-íris. ”

Questão 10: *Será que podemos “enxergar” do que é feito a coca cola e tentar fazer igual?*

A última questão deste questionário subjetivo tinha por finalidade observar a capacidade analítica e a criticidade dos estudantes acerca de toda a temática envolvida, pensada, e apresentada durante a aplicação do produto educacional motivador da construção deste texto. A tratativa aqui era desmistificar quaisquer temas que envolvam argumentos científicos, e que muitas vezes são difundidos como mitos, ou envoltos numa pseudoatmosfera de mistério. 19 respostas foram tidas como insatisfatórias. Estas, aliadas às 16 abstenções, compuseram o percentual de 45,5% das respostas associadas ao grupo 3. 30 respostas (39,0%) foram consideradas suficientemente satisfatórias e, portanto, atribuídas ao grupo 1, e 12 respostas (15,6%) foram consideradas satisfatórias, mas ainda carecendo de associações mais concisas quanto aos fenômenos físicos, figurando, portanto, no grupo 2.

Os resultados supracitados estão dispostos na tabela 10, separados por turma e por grupo de respostas, e também no gráfico 10, em percentuais gerais e por grupo de respostas.

Tabela 11 - Respostas à questão 10, separadas por grupos e turmas.

Questão 10			
	Alimentos	Edificações	Química
Grupo 1	9	12	9
Grupo 2	3	3	6
Grupo 3	18	6	11

Fonte: o autor – 2022.

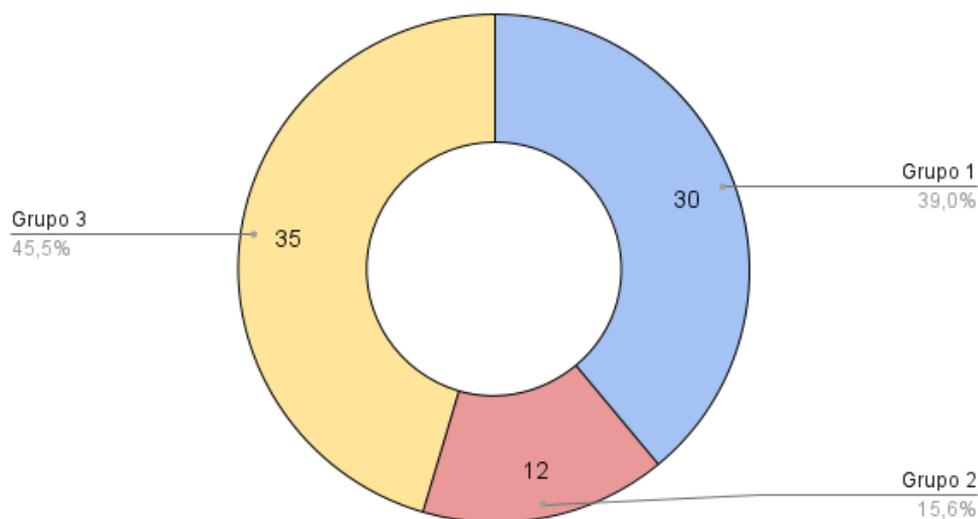
QUESTÃO 10: Alimentos, Edificações e Química.

Gráfico 10: quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas à questão 10.

Fonte: o autor – 2022.

Algumas das respostas consideradas satisfatórias são transcritas na sequência:

“Sim. Para isso podemos usar duas técnicas espectroscópicas já bastante conhecidas. A primeira é a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR). Esta é feita na região do infravermelho médio, e permite, através dos espectros de absorção, determinar os materiais contidos na amostra e o tipo de ligação entre eles. A segunda é a difração de raios X (D RX), em que, pelo padrão dos feixes refratados, gera-se difratogramas que permitem determinar e caracterizar a fase cristalina da amostra de interesse.”

“Pode-se utilizar do conhecimento das cores emitidas por cada um dos elementos químicos existentes para descobrir quais deles compõem a coca cola, uma vez que cada elemento produz um padrão de cores único e característico, tornando possível saber qual elemento químico está sendo observado através dos padrões de cores que ele forma.”

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os percentuais de respostas condizentes com o tema proposto e dentro dos parâmetros observados pela separação das respostas em grupos têm um índice de suficiência superior ao índice de respostas insatisfatórias. O gráfico 11 mostra uma comparação global entre as respostas válidas (já removidas as abstenções) coletadas dos estudantes em função de seus respectivos grupos de respostas.

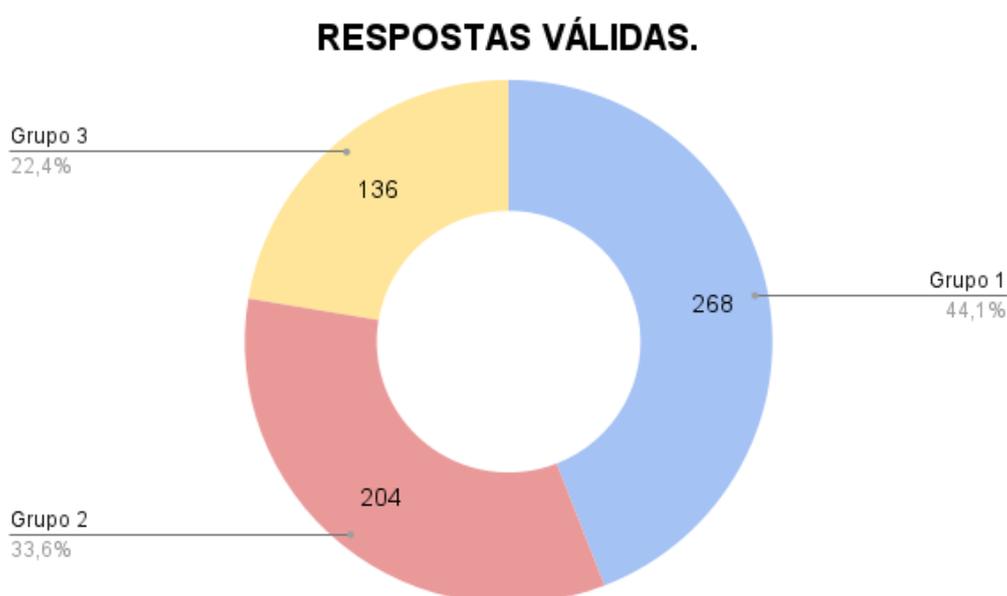


Gráfico 11: Quantidades e percentuais gerais por grupo de respostas válidas.

Fonte: o autor – 2022.

Faz-se necessário salientar que o espaço amostral de estudantes de ensino médio integrado aos cursos técnicos aqui analisados encontra-se hoje em seu primeiro ano de ensino presencial. Muitos apresentam-se um tanto desmotivados e/ou com problemas de ordem psicossomática, oriundos do período pandêmico, ou agravados por ele. O modelo de “ensino emergencial” ao qual adotamos, também trouxe consigo lacunas de conteúdos específicos que podem ter contribuído para a falta de conexão de conceitos físicos presentes nas respostas do grupo 2, e também para a falta total de

interlocução com estes conceitos, ou as desistências nas respostas constantes do grupo 3. Neste último foram incluídas, também, respostas totalmente retiradas de canais virtuais – um vício que os estudantes vêm apresentando reiteradamente.

É perceptível que, quando as questões abordam conceitos físicos mensuráveis, como nas questões 06, 07, 08 e 09, ainda que não envolvam cálculos diretamente, o número de respostas insatisfatórias sobe consideravelmente. Entretanto, desconsiderando-se as abstenções, a verificação das respostas válidas nos conduz a um cenário ainda promissor: 77,7% das respostas satisfazem, ainda que com necessidade de ajustes, as indagações levantadas pelo questionário.

De fato, temos ainda, atrelada às dificuldades inerentes ao ensino de física no Brasil, um cenário sócio-político no mínimo questionável para a educação como um todo. Nos últimos 4 anos, para além das questões de ensino-aprendizagem, que já não eram poucas, vivenciamos também uma sequência de golpes contra a educação e seus atores que transfiguraram-se em evasão, desistências, cortes de bolsas/auxílios, depreciação de patrimônio público e dificuldades de simples manutenção de instalações. Tudo isso aliado a uma crescente onda de obscurantismo conspiratório e notícias falsas, que acabaram pondo em xeque a ciência brasileira e sua produção e permanência, fragilizando instituições de renome, inclusive, internacional.

Com todo este arcabouço movendo-se na contramão do conhecimento científico e de sua disseminação, ainda conseguimos, não sem alguma resistência, um resultado positivo e, quiçá, promissor. Os resultados colhidos neste trabalho aliam-se a outros tantos, infundáveis, que atestam a importância da experimentação para o ensino de física.

Mesmo que uma parcela dos estudantes, considerados neste trabalho, tenha se absterido de responder ao questionário, todos estiveram presentes e participantes às apresentações e aplicações do produto educacional envolvido na redação deste texto. De sorte, o fato mencionado corrobora a ideia de SANTOS (2022) e Freire (1987) sobre uma educação transformadora, dialógica, conectada à realidade do estudante, cuja conexão é orientada pelo professor, que neste ato tem o papel não apenas de colocar, recolocar conteúdos, ou explicar o mundo através dos mesmos, mas também de instigar

os educandos, questionando-os, confrontando seus argumentos pré-concebidos de modo a trazê-los aos fatos científicos.

Deixamos, por fim, a proposta de reprodução tanto da sequência didática adotada neste projeto, quanto a construção do modelo de espectroscópio utilizado, lembrando que o sítio onde se encontra a tabela periódica, que ajuda a compor o produto educacional, é de livre acesso e a mesma pode também ser utilizada como material de pesquisa e apoio.

9 REFERÊNCIAS

ABREU, J. B.; FERREIRA, D. T.; FREITAS, NM da S. **Os três momentos pedagógicos como possibilidade para inovação didática**. XI ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, p. 1-9, 2017.

ARAÚJO, Laís Baldissarelli; MUENCHEN, Cristiane. **Os três momentos pedagógicos como estruturantes de currículos: algumas potencialidades**. Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 51-69, 21 maio 2018. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). <http://dx.doi.org/10.5007/1982-5153.2018v11n1p51>.

BONFIM, Danúbia Damiana Santos; COSTA, Priscila Carozza Frasson; DO NASCIMENTO, William Júnior. **A abordagem dos três momentos pedagógicos no estudo de velocidade escalar média**. Experiências em Ensino de Ciências, v. 13, n. 1, p. 187-197, 2018.

CRESWELL, John W. **Investigação qualitativa e projeto de pesquisa: escolhendo entre cinco abordagens**. Trad. De Sandra Mallmann. 3ª ed. Porto Alegre: Penso, 2014.

DELIZOICOV, D; MUENCHEN, C. **Os três momentos pedagógicos e o contexto de produção do livro “Física”**. São Paulo: Cortez, 2014.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**, ed. Elsevier, 23ª tiragem.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 39. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2009, p. 148.

GUNTHER, H.; LOPES JÚNIOR, J. **Perguntas abertas versus perguntas fechadas: Uma comparação empírica**. Psicologia: Teoria e Pesquisa, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 203–213, 2012. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/revistaptp/article/view/17094> . Acesso em: 20 set. 2022.

LOOS, Pedro; *et al.* **O átomo de Bohr explicado**. Curso de Física Básica do canal Ciência Todo Dia, capítulo 10, episódio 3. 11 min. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=GPrqg-NzCg&t=14s>. Acesso em 01 jul. 2022.

MARQUES, F.; *et al.* **Estudo do espectro de H e Na**. Instituto de Física da Universidade de São Paulo. 28 ago. 2006.

MARTINS, Sônia Rodrigues; AMORIM, Ronni G. G. **Introdução de tópicos de mecânica quântica no ensino médio**. Programa de pós-graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade de Brasília, 2019.

MORAES, Devacir Vaz de. **Estudo de radiações ionizantes e não ionizantes utilizando como facilitador a câmara de nuvens caseira**. 2019. 122 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Pontal do Araguaia, 2020.

SANTANA, Fábio Bartolomeu; SANTOS, Paulo José Sena dos. **Espectroscopia e modelos atômicos: uma proposta para a discussão de conceitos de Física Moderna no ensino médio.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 34, n. 2, p. 555-589, ago. 2017.

SANTOS, Cleber Jesus de. et al. **Descargas elétricas atmosféricas: uma aplicação da sequência didática dos três momentos pedagógicos.** Revista Educação Pública, v. 1, n. 3, 2022.

SANTOS, Marcelo K. T.; SOUZA, João F. **Sequência didática: Espectroscopia e suas relações com o cotidiano.** Programa de pós-graduação da Universidade Federal do Pará – MNPEF, 2020.

SILVA, André Coelho da; ALMEIDA, Maria José P. M. **Física quântica no ensino médio: O que dizem as pesquisas.** Cad. Bras. Ens. Fís., v. 28, n. 624 3: p. 624-652, dez. 2011.

SILVA, Everaldo Mateus da. **Uma sequência didática para o ensino da espectroscopia no ensino médio por meio da experimentação.** 2020. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2020.

SUMMERS, Joseph; *et al.* **Lab 1: CD spectrometer.** Canal MIT OpenCourseWare. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=fl42pnUbCCA>. Acesso em 01 mar. 2022.

THE SODIUM DOUBLET. In: HyperPhysics, hosted by Department of Physics and Astronomy, Georgia State University, 2016. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/sodzee.html>. Acesso em 25 mar. 2023.

10 APÊNDICE A – O PRODUTO EDUCACIONAL

10.1 O PRODUTO EDUCACIONAL: ESPECTROSCÓPIO

Como já anunciado na seção 4, o aparato experimental utilizado fora construído tomando-se por base o vídeo apresentado no canal do MIT, no YouTube, intitulado “Lab.1: Spectrometer” (SUMMERS, *et al.* 2013). Seguem-se, doravante, a descrição do material utilizado e sua montagem.

10.1.1 MATERIAL UTILIZADO

- 1 (uma) unidade de foamcore de cor preta;
- 1 (um) rolo de silvertape;
- 1 (um) rolo de fita adesiva;
- 1 (uma) régua milimetrada;
- 1 (um) CD;
- 2 (duas) unidades de lâmina de barbear;
- 1 (um) estilete;
- 1 (um) reator;
- 1 (uma) lâmpada de vapor de sódio;
- 1 (uma) lâmpada fluorescente;
- 1 (uma) lâmpada de led.

Figura 28 - Material utilizado na construção do espectroscópio.

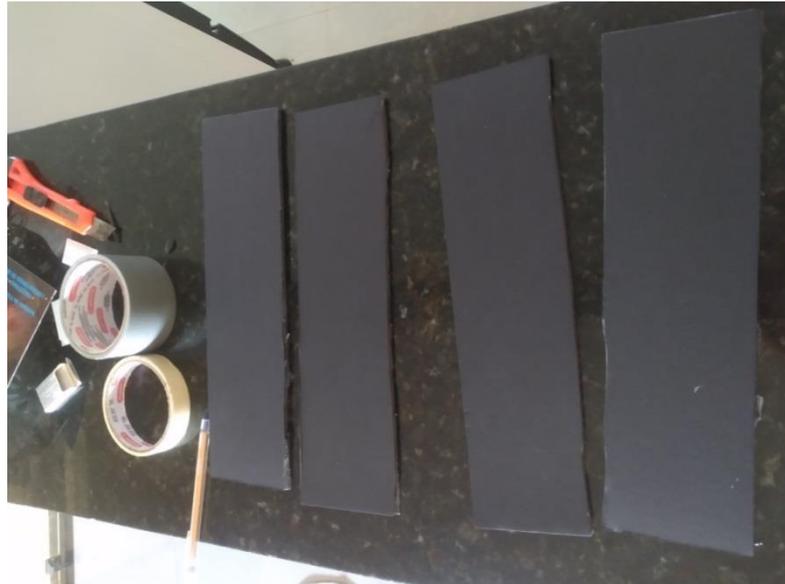


Fonte: arquivo pessoal - 2022.

10.1.2 MONTAGEM DO ESPECTROSCÓPIO

Cortamos a peça de “foamcore” em 4 (quatro) partes iguais, de 15 (quinze) por 5 (cinco) centímetros, unindo-as para formar um tubo.

Figura 29 - Cortes setoriais da peça de “foamcore”.



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

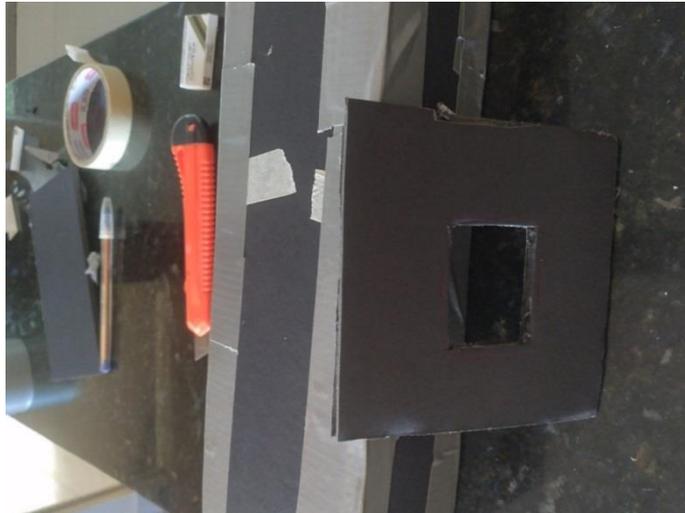
Figura 30 - Montagem inicial do tubo espectroscópico.



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

Em seguida, separamos uma peça de 100 cm^2 do mesmo material (“foamcore”), dotada de um buraco de 4 cm^2 de área, no centro.

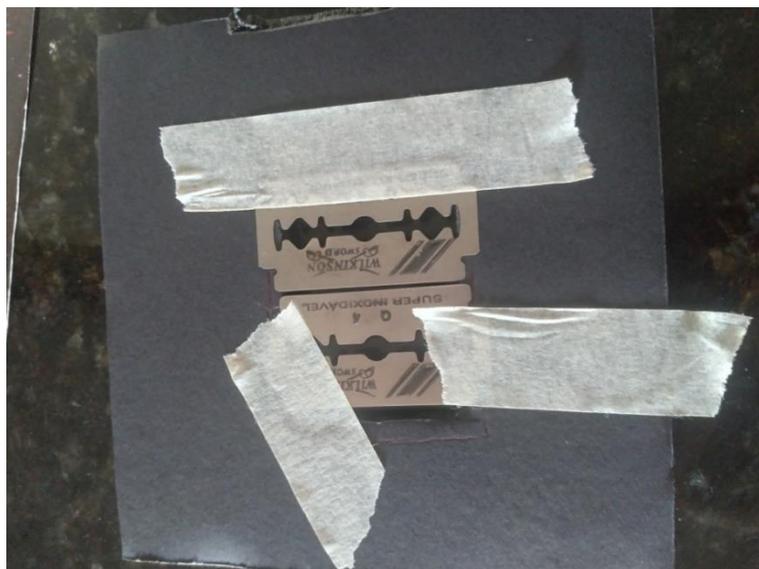
Figura 31 - Seção quadrada (100 cm^2) com orifício (4 cm^2).



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

Construímos uma fenda utilizando as lâminas de barbear, cuja abertura tem a largura de uma folha de transparência.

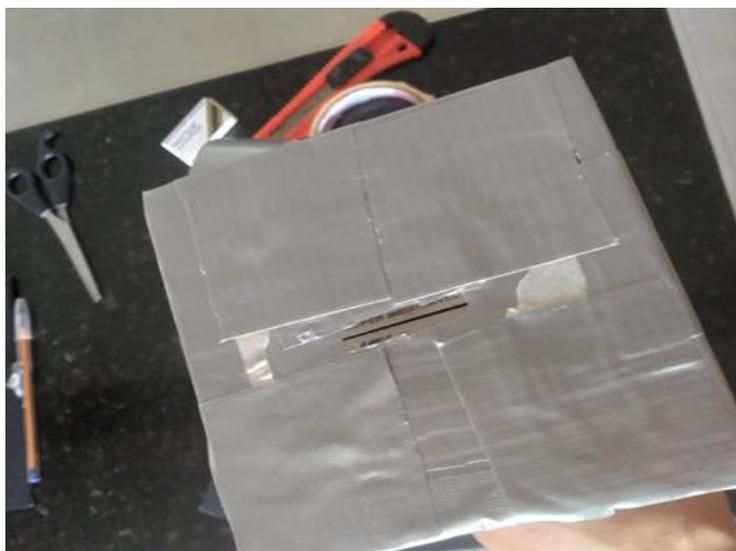
Figura 32 - Fenda de entrada de luz do espectroscópio.



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

Juntamos o quadrado com orifício a uma das extremidades do tubo, envolvendo tudo com “silvertape”, de maneira a bloquear eventuais entradas de luz.

Figura 33 - Junção do tubo com a base da fenda.



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

Na extremidade oposta, colocamos um quadrante de um CD, tendo removido seu rótulo, que funcionará como uma rede de difração.

Figura 34 - Parte de trás do espectroscópio: pedaço de CD usado como grade difratora.



Fonte: arquivo pessoal - 2022.

10.2 O PRODUTO EDUCACIONAL: TABELA PERIÓDICA VIRTUAL

A tabela periódica virtual constante deste trabalho foi construída em parceria com o colega institucional, técnico em tecnologia da informação, bacharel em Engenharia Elétrica, e especialista em Segurança do Trabalho, Israel Rodrigues Soares, do Instituto Federal de Goiás, campus Aparecida de Goiânia. A linguagem de programação utilizada foi a “javascript”, e as linguagens de programação “HTML” e “CCS”.

Nela constam informações comuns sobre os elementos químicos, como número atômico e massa molar, além de cor, estado físico natural, e o espectro de absorção emitido por eles. Esta tabela encontra-se em exposição permanente à visitação no sítio <https://raelis.github.io/tabela-periodica/>.

Figura 35 - Imagem da apresentação das informações constantes da tabela periódica virtual.

11 Na Sódio

Sódio / 'sɔdi.əm / é um elemento químico com símbolo na (do grego antigo *νῆπιον*) e número atômico 11. É um metal macio, prateado e altamente reativo. Na tabela periódica, está na coluna 1 (metais alcalinos) e compartilha com os outros seis elementos nessa coluna que possui um único elétron em sua concha externa, que doa prontamente, criando um átomo carregado positivamente - um cátion.

Aparência
Metálico Branco Prateado

Descoberto por
Humphry Davy

Categoria
Metal Alcalino

Fase (CNTP)
Sólido

Massa Atômica (u)	Densidade (g/L)	Ponto de Ebulição (K)	Ponto de Fusão (K)
22.9898	0.9680	1156.0900	370.9440

Imagem espectral do elemento

Leia mais na [Wikipedia](#)

Fonte: arquivo pessoal - 2022.

10.3 ROTEIRO DE USO

Caríssimo(a) colega professor(a):

Nossa incessante busca pela melhoria das relações de ensino-aprendizagem nos mais variados campos da ciência, é de conhecimento geral. Na Física, especificamente, enfrentamos um incalculável desgaste no que concerne ao interesse, à disposição, e também às dificuldades pregressas de nossos estudantes.

Pensando em algumas destas questões, que podem ser pontuais ou não, apresentamos este trabalho como uma tentativa viável (talvez?) de estímulo à instrução científica formal, ou provocação de atividade questionadora através de um efeito físico deveras conhecido, porém, singular.

Na esperança de que esta experimentação possa lhe ser útil no exercício de sua lida em sala de aula, elaboramos uma pequena sugestão de roteiro para o uso dos aparatos já mencionados, e descritos até aqui.

10.3.1 ESPECTROSCÓPIO

De posse do espectroscópio e do reator com lâmpada já montados (estes últimos, seguindo as orientações do fabricante), sugerimos a seguinte sequência para seu uso em observação do espectro de emissão:

- i) Disponha parte do equipamento (reator com lâmpada) sobre uma superfície plana – uma mesa, por exemplo;
- ii) ligue o reator na tomada considerando a especificação do fabricante. (Neste trabalho, 220 V);
- iii) aguarde a completa emissão de luz pela lâmpada;
- iv) aponte a fenda de entrada do espectroscópio diretamente para a fonte luminosa e posicione um dos olhos imediatamente atrás da grade de difração – face diametralmente oposta;
- v) ajuste a posição do espectroscópio de maneira a que o padrão de emissão seja projetado nas paredes laterais internas do aparato;
- vi) utilizando uma câmera de celular, fotografe as imagens produzidas na experimentação.

10.3.2 TABELA PERIÓDICA VIRTUAL

Nossa tabela periódica virtual encontrar-se-á continuamente disponível na internet, em domínio “github”. Para acessá-la e usá-la em experimentações, sugerimos os passos a seguir:

- I) Em um computador (ou celular “smartphone”) abra o navegador de internet;
- II) acesse a página de pesquisa do “google”;
- III) digite o endereço eletrônico <https://raelis.github.io/tabela-periodica/> e aguarde o carregamento da página;
- IV) na tabela, selecione o elemento químico que gostaria de verificar, e clique nele com o “mouse” utilizando o botão esquerdo;
- V) uma janela menor se sobreporá à tabela; nela, você terá acesso a informações sobre o elemento químico selecionado, incluindo seu espectro de emissão. O mesmo poderá ser usado para comparação com o espectro observado e fotografado no espectroscópio.

Para avaliação, e também como proposta de análise ou verificação de aprendizagem, sugerimos a aplicação de um questionário aberto, como o disposto neste texto (Apêndice A). Entretanto, este procedimento pode, e deve, ficar a cargo do(a) nobre colega que se encontra em exercício.

10.4 QUESTIONÁRIO SUBJETIVO

O questionário que aqui aparece é parte integrante do produto educacional descrito neste trabalho; fora utilizado como meio de verificação de aprendizagem e coleta de informações para a análise semiquantitativa, discutida no transcrito deste texto. Pode, ainda, ser usado, ou servir de base/inspiração, para os colegas que assim se interessarem pelo tema proposto nesta dissertação.

Perguntas sobre a natureza da luz.

QUESTÃO 01. Você deve ter observado que o arco-íris, um fenômeno que costuma acontecer em dias de chuvas, apresenta uma série de cores diferentes. Podemos ver o arco-íris em dias sem chuva? Em que lugares?

QUESTÃO 02. De que é feito o arco-íris? Como ele é produzido?

QUESTÃO 03. Esse padrão de arco-íris está associado com a luz branca? Um LED pode produzir o arco-íris?

QUESTÃO 04. Um gás pode emitir luz? Um líquido pode emitir luz? E um sólido? Um átomo ou molécula pode emitir luz? Quais são os objetos ou substâncias que você conhece que emitem luz e em que circunstâncias? Será possível enxergar um arco-íris associado com estes objetos ou substâncias?

QUESTÃO 05. Por falar em luz, de que é feito a luz? Ela é líquida, gasosa, sólida ou o quê?

QUESTÃO 06. Será que tem como eu “medir” a luz de alguma maneira? ou melhor, a luz tem algo mensurável?

QUESTÃO 07. Por que existem cores diferentes?

QUESTÃO 08. O que tem de especial nas lâmpadas de cores diferentes, como as lâmpadas de neon, usadas em propagandas comerciais nos outdoors?

QUESTÃO 09. Por que aparece o arco-íris em um CD-rom?

QUESTÃO 10. Será que podemos “enxergar” do que é feito a coca cola e tentar fazer igual?

11 ANEXO A – DECLARAÇÃO DE APLICAÇÃO DE PRODUTO EDUCACIONAL



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS APARECIDA DE GOIÂNIA

DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins que o Professor Franco Vinicius Delfino, matrícula 1198823, lotado no Campus Aparecida de Goiânia do IFG, aplicou o produto educacional "Espectro de raios dos elementos químicos: uma sugestão de aplicação para o ensino médio" junto às turmas de terceiro ano dos Cursos Técnicos Integrados ao Ensino Médio em Alimentos, Edificações e Química durante o mês de julho de 2022, no transcorrer de suas aulas regulares.

(assinado eletronicamente)

Prof. Marcos Flávio Mércio de Oliveira

Coordenador do Curso Técnico Integrado em Agroindústria

Portaria IFG 1425/2021

(assinado eletronicamente)

Proª Ana Maria Barboza Lemos

Coordenadora do Curso Técnico Integrado em Edificações

Portaria IFG 2156/2022

(assinado eletronicamente)

Prof. Carlos Rangel Neves Otto

Coordenador do Curso Técnico Integrado em Química

Portaria IFG 2190/2022

Documento assinado eletronicamente por:

- Carlos Rangel Neves Otto, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - APA-CCTIQ, em 28/03/2023 10:00:56.
- Ana Maria Barboza Lemos, COORDENADOR(A) - FUC1 - APA-CCTIED, em 27/03/2023 11:41:45.
- Marcos Flavio Mercio de Oliveira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - APA-CCTIAG, em 27/03/2023 11:18:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/03/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 390576
Código de Autenticação: c76831fba8

