



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



**RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS:
Uma proposta para o ensino de Física Quântica**

GIOVANA ESPÍNDOLA BATISTA

Tramandaí
Março de 2019



Giovana Espíndola Batista

**RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS:
Uma proposta para o ensino de Física Quântica**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Sociedade Brasileira de Física, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal
Orientador

Prof. Dr. Ederson Staudt
Coorientador

Tramandaí
Março de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Batista, Giovana E.

Resolução de problemas abertos: Uma proposta para o ensino de Física Quântica / Giovana E. Batista. -- 2019.

116 f.

Orientador: Jorge Rodolfo Silva Zabadal.

Coorientador: Ederson Staudt.

Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus Litoral Norte, Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Tramandaí, BR-RS, 2019.

1. Resolução de problemas abertos. 2. Ensino de Física. 3. Física Quântica. I. Zabadal, Jorge Rodolfo Silva, orient. II. Staudt, Ederson, coorient. III. Título.

Giovana Espíndola Batista

**Resolução de Problemas Abertos:
Uma proposta para o ensino de Física Quântica**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Sociedade Brasileira de Física, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em março de 2019.

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal – MNPEF-UFRGS/CLN (Orientador)

Prof. Dr. Roniere dos Santos Fenner – MNPEF-UFRGS/CLN

Prof. Dra. Karen Cavalcanti Tauceda – MNPEF-UFRGS/CLN

Prof. Dr. Orimar Antônio Battistel – UFSM

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo apoio, força e compreensão pelos momentos de ausência. Aos amigos, colegas e familiares que compartilharam comigo desta conquista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabada, pela disponibilidade, confiança, dedicação e paciência para a realização do trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Ederson Staudt, pela colaboração, disponibilidade e incentivo durante o percurso.

Agradeço aos orientadores pelas inúmeras conversas que estimularam e muito colaboraram para a realização do trabalho.

Ao MNPEF, pela formação e qualificação dos professores do Ensino Médio e Fundamental.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo produzir uma estratégia metodológica para o desenvolvimento da autonomia dos alunos, aperfeiçoando algumas habilidades, como: investigar, interpretar, resolver e formular problemas. Pretende-se contribuir para a aprendizagem significativa e estimular a mudança de atitude dos alunos a respeito de sua própria aprendizagem. Metodologicamente, foi realizada uma sequência didática para a resolução de problemas abertos. Nesse sentido, foram desenvolvidos os conceitos de física quântica, em especial a teoria dos quanta, o efeito fotoelétrico, o modelo atômico de Bohr, a dualidade da luz, a função de onda de Schrödinger e o princípio da incerteza de Heisenberg, relacionando-os aos avanços tecnológicos por meio da elaboração de problemas abertos intrigantes e com questões relacionadas às realidades dos alunos. A proposta foi desenvolvida em uma turma de 3º ano do Ensino Médio de uma escola da rede pública estadual situada em Porto Alegre - RS. Dentre os resultados obtidos, pode-se destacar a maior participação em aula, autonomia para realizar investigações e trabalhar em grupo, discernimento para interpretar questões mais complexas. Em razão disso, conclui-se que a metodologia contribui para desenvolver as habilidades pertinentes ao ensino da Física.

Palavras-chaves: Resolução de problemas abertos. Ensino de Física. Física Quântica.

ABSTRACT

This work aims to produce a methodological strategy for the development of students autonomy, improving some skills, such as: investigating, interpreting, resolving and formulating problems. It intends to contribute to meaningful learning and stimulate the change of attitude of students regarding their own learning. Methodologically, a didactic sequence was performed to solve open problems. In this sense, we developed the concepts of quantum physics in particular the theory of quanta, the photoelectric effect, the atomic model of Bohr, the duality of light, the Schrödinger wave function and the principle of uncertainty of Heisenberg relating them to Technological advances through the elaboration of intriguing open problems and with questions related to the realities of the students. The proposal was developed in a class of third year of high School of a public school of the state network located in Porto Alegre-RS. Among the results obtained, we can highlight the greater participation in class, autonomy to perform investigations and work in groups, discernment to interpret more complex questions. Because of this, it is concluded that the methodology contributes to develop the skills pertinent to the teaching of physics.

Keywords: Solving open problems. Teaching physics. Quantum physics.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Desempenho dos alunos no 1º questionário	38
Gráfico 2 - Desempenho dos alunos na primeira etapa de resolução.....	41
Gráfico 3 - Desempenho dos alunos na segunda etapa de resolução	44
Gráfico 4 - Desempenho dos alunos na terceira etapa de resolução.....	46
Gráfico 5 - Desempenho dos alunos na quarta etapa de resolução.....	48
Gráfico 6 - Desempenho dos alunos no 2º questionário investigativo.....	50
Gráfico 7 - Rendimento do Grupo A na resolução de problemas.....	55
Gráfico 8 - Rendimento do Grupo B na resolução de problemas.....	56
Gráfico 9 - Rendimento do Grupo C na resolução de problemas.....	57
Gráfico 10 - Rendimento do Grupo D na resolução de problemas.....	58
Gráfico 11 - Rendimento do Grupo E na resolução de problemas.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do campo elétrico e magnético	91
Figura 2 - Espectro Eletromagnético	92
Figura 3 - Catástrofe do UV.....	93
Figura 4 - Radiações eletromagnéticas incidindo em uma placa metálica	97
Figura 5 - Efeito Fotoelétrico	98
Figura 6 - Demonstra que ao absorver um fóton, o elétron passa para um estado excitado.....	104
Figura 7 - Níveis de energia do átomo de Hidrogênio	105
Figura 8 - Espectro de absorção e de emissão do Hidrogênio.....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios para atribuição de conceitos	36
Quadro 2 - Etapas da metodologia de problemas abertos	69
Quadro 3 - Planejamento do Produto Educacional	70
Quadro 4 - Planejamento do Produto Educacional	71
Quadro 5 - Alguns valores, em eV, da função trabalho (Φ) de alguns metais.....	101

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 PROBLEMAS ABERTOS.....	15
2.2. ORIENTAÇÃO PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS.....	19
2.3 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS POR INVESTIGAÇÃO	21
2.4 AVALIAÇÃO METODOLÓGICA.....	22
2.5.RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS E A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO...	23
3 OBJETIVOS E METODOLOGIA	26
3.1 PROBLEMAS RELACIONADOS À TEORIA QUÂNTICA.....	28
3. 2 PROBLEMAS SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO	29
3.3 PROBLEMAS DE ESPECTRO DE ABSORÇÃO E DE EMISSÃO – MODELO ATÔMICO DE BOHR	31
3.4 PROBLEMAS SOBRE DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	32
4 AVALIAÇÃO	35
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
6 ANÁLISE GERAL	54
6.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GRUPO A.....	54
6.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GRUPO B.....	55
6.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GRUPO C.....	56
6.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GRUPO D.....	57
6.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GRUPO E	59
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	64
APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL	66
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO INVESTIGATIVO	89
APÊNDICE C – TEXTO DE APOIO PARA ALUNOS: ORIGENS DA TEORIA QUÂNTICA	90
APÊNDICE D – TEXTO DE APOIO PARA ALUNOS: EFEITO FOTOELÉTRICO...	97
APÊNDICE E – TEXTO DE APOIO PARA OS ALUNOS: MODELOS ATÔMICOS	103
APÊNDICE F - TEXTO DE APOIO PARA ALUNOS: DUALIDADE ONDA- PARTÍCULA	108
ANEXO A – O INÍCIO DE UMA MODERNA REVOLUÇÃO	114

1 INTRODUÇÃO

O ensino da física não tem acompanhado as inovações da ciência moderna. Uma possibilidade de contornar esse cenário pode ser a proposição de questões presentes e atuais a fim de despertar o interesse dos alunos em entender os princípios físicos, os quais explicam os fenômenos utilizados pela ciência e tecnologia contemporânea.

Apesar de todos os esforços empreendidos por parte dos professores para o que o ensino desse componente curricular seja baseado numa abordagem construtivista, este continua desvinculado da realidade atual. Sabe-se que a abordagem dos conteúdos de física no Ensino Médio obedece à sequência apresentada a seguir: mecânica, física térmica, óptica, ondulatória e eletromagnetismo. Assim sendo, a física moderna raramente abordada no final do terceiro ano. Desta maneira, o entendimento da área do conhecimento, muitas vezes, torna-se superficial ou mesmo inexistente.

Frente aos avanços tecnológicos da atualidade, pensar uma abordagem contextualizada e inovadora sobre os conceitos da Física Moderna poderá contribuir para a aprendizagem significativa e a alfabetização científica apropriada aos nossos dias.

Nesse contexto, a proposta deste trabalho consiste em contribuir para o ensino de Física Quântica no Ensino Médio através da metodologia de resolução de problemas abertos. Esses, por sua vez, são caracterizados por não possuírem soluções preestabelecidas, permitindo explorar diversas maneiras de resolvê-los.

As situações problemas oportunizam a contextualização entre conteúdo e cotidiano. O papel do professor nesse contexto é estabelecer conexões entre a experiência pessoal do aluno diante do fenômeno e o conteúdo didático. Por essa razão, a resolução de problemas abertos assume papel de grande importância no aprendizado, pois estimula discussões entre os alunos e o professor, promovendo a interação social e a troca de experiências.

Para tanto, o primeiro momento da sequência didática proposta foi a utilização de textos com o objetivo de auxiliar no entendimento inicial dos assuntos pertinentes. As discussões e aprofundamentos dos tópicos são organizados através da resolução dos problemas abertos. A elaboração das questões abertas tem como ponto de partida a abordagem de questões atuais, inovadoras e que possuem a finalidade de despertar

a curiosidade do solucionador. Assim sendo, o material tem a finalidade de propor a mudança na estratégia didática e, dessa maneira, mudar a postura do aluno frente a sua aprendizagem, estimulando seu interesse pelo componente curricular, como também desenvolver as habilidades de trabalhar em grupo, de interpretação, resolução e formulação de problemas.

O trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro apresenta a fundamentação teórica que embasa a metodologia e algumas reflexões sobre a resolução dos problemas abertos. O segundo contempla os objetivos e a metodologia do trabalho. A apresentação da avaliação metodológica é realizada no terceiro capítulo. No quarto e no quinto capítulos, estão as análises obtidas dos questionários investigativos, das resoluções dos problemas e das questões elaboradas pelos grupos, como também a reflexão dos resultados obtidos. E o sexto capítulo contempla as reflexões finais deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Sabe-se da dificuldade dos alunos nas disciplinas de Física e Matemática, pois os índices educacionais apontam para o baixo rendimento dos estudantes e a elevada taxa de reprovação nestes componentes curriculares. São muitos os fatores que contribuem para este desempenho no componente específico de física. Dentre alguns deles, podemos ressaltar que a matéria, na maioria das vezes, é abordada de forma eminentemente mecânica, não apresentando relação com o cotidiano, dando ênfase a fórmulas, listas de exercícios repetitivos, cálculos e equações que pouco interesse despertam no aluno. Poucos alunos são os que conseguem bons resultados, sendo vistos como exceção à regra. Os resultados dados do programa internacional de avaliação de estudantes (Pisa)¹ de 2015 confirmam este triste diagnóstico.

Assim, o ensino de física no Brasil vive um momento de grande desafio. Frente a isso, são necessárias estratégias didáticas que busquem a participação ativa do aluno no processo de aprendizagem. É possível cogitar que uma maneira de atenuar o baixo aproveitamento dos alunos é aprofundarmos e qualificarmos as reflexões sobre as metodologias de ensino utilizadas pelos professores em sala de aula.

Nesse sentido, a atividade de solucionar problemas abertos pode contribuir para que os alunos desenvolvam a capacidade argumentativa e a autonomia na busca de informações para a construção do seu conhecimento. Segundo Echeverría e Pozo (1998), o objetivo principal da aprendizagem através da resolução de problemas é desenvolver no aluno o hábito de enfrentar a aprendizagem como um desafio, para o qual se deve encontrar uma resposta. Para Vergnaud (2013), são as situações-problemas que dão sentido aos novos conhecimentos.

Normalmente, o ensino de Física está centrado na resolução de exercícios repetitivos, favorecendo a abordagem numérica dos cálculos em detrimento da compreensão do fenômeno em si. Entretanto, é fundamental distinguirmos as diferenças entre um problema e um exercício. Lopes (2009, p.93) distingue exercícios e problemas da seguinte forma:

Um exercício deve, perfeitamente, ser utilizado para operacionalizar um conceito, treinar um algoritmo, treinar o uso de técnicas, regras ou leis, e para exemplificar; um problema deve ser usado para otimizar estratégias de

¹ ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. Programme for International Student Assessment – PISA. Results from PISA 2015. **OECD**, 2015. Disponível em: <<https://www.oecd.org/pisa/PISA-2015-Brazil-PRT.pdf>>. Acesso em: dez. 2018.

raciocínio, proporcionar o crescimento dos conceitos e desenvolver o conhecimento processual.

Os exercícios são recursos didáticos com o objetivo de consolidar habilidades instrumentais básicas ou proporcionar uma revisão dos conceitos trabalhados. Não há nada de errado em utilizá-los. O erro está em trabalhar sempre com as listas de exercícios, porque, uma vez adquirida a compreensão do conceito por parte do aluno, os exercícios são realizados de maneira automática e repetitiva, não proporcionando a reflexão necessária para a aquisição de novos conhecimentos ou a expansão dos já existentes.

Em tempo, é preciso ter cuidado para que os problemas propostos em aula não se tornem simples resoluções de exercícios, que pouco contribuam para ajudar o aluno a entender os fenômenos físicos e relacioná-los com o seu cotidiano. Para Pozo (1998), os problemas exigem dos alunos a ativação de diversos tipos de conhecimento, atitudes, motivações e conceitos. As situações problemas abertas ou novas representam uma demanda cognitiva e motivacional maior do que a execução de exercícios.

Na revisão, encontram-se referências tanto de problemas abertos como de problemas fechados. É necessário diferenciá-los. Entende-se por problemas fechados ou bem formulados as questões nas quais todas as informações e dados para a resolução do problema são fornecidos. Para a resolução dos problemas fechados, os alunos trabalham as habilidades de leitura, compreensão e interpretação dos dados, desenvolvem o cálculo, analisam e interpretam o resultado final. Nos problemas fechados, sempre existirá uma única resposta a ser encontrada e interpretada.

Já nos problemas abertos, ou de enunciados intencionalmente incompletos, não são informados todos os dados necessários para a sua resolução e não há apenas uma resolução preestabelecida. Ou seja, são considerados problemas abertos as situações que oportunizam a reflexão por parte do solucionador, a projeção de hipóteses e a tomada de decisões na busca de resolvê-lo. Segundo Rodrigues e Tinoco:

os “problemas abertos”, ou também chamados de problemas de enunciado aberto, como o próprio nome nos diz, nos traz uma questão aberta, ampla, em que cada problema dará uma nova condição de hipóteses a serem analisadas. Características dos problemas abertos segundo podem ser descritas como:

- É sempre um problema contextualizado.
- Trata de uma questão ampla.

- Sem dados literais e numéricos.
- Trata da vivência do aluno ou situações que relacionam um acontecimento do momento (apud PIETROCOLA, 2001, p. 128).

Assim, para Gil Perez (1987), os problemas abertos incentivam a atitude investigativa, participativa e consciente por parte do solucionador. Essas atividades mostram-se úteis também para aproximar o aluno de alguns aspectos da metodologia científica. O autor se opõe aos problemas tradicionais pela ausência de uma reflexão qualitativa e a posterior emissão de hipóteses.

2.1 PROBLEMAS ABERTOS

Vivemos em uma sociedade na qual os conhecimentos, oriundos das ciências são utilizados por todos, principalmente na forma de aparelhos tecnológicos. Cada vez mais um maior número de pessoas acessa esses bens. Nesse sentido, o ensino de física assume um papel muito importante para a sociedade, pois gera autonomia dos saberes científicos, possibilitando que o aluno seja capaz de negociar suas decisões, além de desenvolver a capacidade de comunicação, domínio e responsabilidade diante de situações concretas.

Para tanto, é fundamental propiciar ao aluno momentos de reflexão, provocá-lo para que possa perceber a aplicabilidade dos conteúdos trabalhados em aula, colocá-lo frente às situações problema que poderão se assemelhar às situações de cotidiano ou no mercado de trabalho. Além disso, estimular o hábito à pesquisa tão importante para o desenvolvimento de sua autonomia. Frente a tudo isso, a resolução de problemas abertos enquadra-se em uma perspectiva motivacional e estimula a criatividade, pois cada aluno utilizará seus conhecimentos, experiências e interpretações para resolver a situação problema. Ademais, estas habilidades poderão ser utilizadas em quaisquer outras situações de sua vida.

Nesse mesmo sentido, o aluno também desenvolve a habilidade de trabalhar em grupo, defender e formular hipóteses, elaborar argumentações, buscar informações e analisá-las ao invés de, simplesmente, memorizar fórmulas e exercícios:

reduzir os problemas científicos a tarefas matemáticas, o aluno estará resolvendo tarefas sem significado para ele. (...) exigiríamos uma maior dedicação à solução de problemas conceituais ou qualitativos, ou seja, a compreender e explicar situações científicas e cotidianas a partir dos conceitos da ciência. (POZO, 1998, p.37).

Neste contexto, as questões abertas e qualitativas possibilitam a ressignificação do ensino de física. Questões qualitativas proporcionam o entendimento e o aprofundamento dos conceitos físicos e seus significados, pois abarcam aspectos internos à estrutura conceitual da disciplina, abordam os fenômenos cotidianos ou as situações históricas. Em suma, proporcionam a contextualização da abordagem científica e permitem desenvolver a capacidade de compreender novas situações.

Defendemos que nos planejamentos escolares haja um espaço cada vez maior para atividades de Resolução de Problemas que se baseiam no tratamento de situações-problema abertas e mais próximas da realidade, ao invés delas se restringirem unicamente aos exercícios que exigem apenas a aplicação de algoritmos de resolução já decorados pelos alunos (atividades repetitivas). Partimos do pressuposto de que essas atividades didáticas, além de auxiliarem no desenvolvimento da capacidade e de autonomia dos alunos para enfrentarem situações-problema do dia-a-dia, ajudam no aprimoramento do desempenho necessário frente às exigências impostas pela sociedade atual (DCNEM, 1998).

Muitos autores defendem a resolução de problemas abertos, pois o processo assemelha-se ao método científico e permite que o aluno desenvolva habilidades diferentes, tais como o pensamento hipotético-dedutivo, fundamental para a ciência. A atividade também estimula a criatividade como elaboração de hipóteses, de estratégias e debates para a solução. Essas estratégias didáticas proporcionam processos de investigação que solidificam a aquisição dos conhecimentos científicos a partir de uma perspectiva pedagógica.

Para Juan Ignacio Pozo (1998, p.84):

A utilização desse tipo de problema é a melhor aproximação possível do trabalho científico, permitindo que o aluno domine alguns dos procedimentos e conceitos da ciência e também que tenha uma visão menos idealizada ou falsa dos processos de construção do conhecimento científico.

Neste sentido, o ENEN propõe cinco eixos cognitivos para todas as áreas desenvolverem: dominar linguagens, compreender fenômenos, enfrentar situações-problemas, construir argumentação e elaborar propostas. Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, que norteiam os currículos da Educação Básica, sugerem um conjunto relacionado a três grandes competências. São elas: representação e comunicação; investigação e compreensão e contextualização sociocultural.

A resolução de problemas abertos torna-se importante em sala de aula por possibilitar ao aluno estabelecer relações entre o conteúdo e o cotidiano, instigando

sua curiosidade, fomentando a argumentação e o debate, desenvolvendo o pensamento crítico ao induzir a análise e a interpretação de dados, buscando conclusões, avaliando e decidindo as decisões. Assim sendo, essa estratégia metodológica aborda e trabalha com os eixos cognitivos e as competências sugeridas pelas Diretrizes Educacionais.

Há também argumentos na literatura que referem as mudanças da dinâmica da aula em razão da utilização dos problemas abertos. Segundo Robison (2017, p.2):

esse tipo de atividade contribui para uma mudança do ritmo da aula e força os alunos a terem um papel ativo, expondo rapidamente algumas deficiências em seu conhecimento; ao trabalho colaborativo e auxílio na transição entre as experiências da vida cotidiana e a compreensão dos conceitos físicos; ao aumento da capacidade criativa dos estudantes; à promoção do pensamento crítico, geralmente visto como crucial para a aprendizagem em Física; à superação da falta de interesse dos estudantes, possivelmente relacionada às abordagens abstratas, desvinculadas ao mundo real.

A resolução de problemas abertos difere-se das metodologias tradicionais porque estimula o trabalho em grupo e as pesquisas por investigação, permitindo explorar a comunicação e a argumentação através do debate e da troca de informação. Permite o ato do aluno assumir a responsabilidade sobre a própria aprendizagem (POZO, 1998). A estratégia tem o potencial para a construção e a consolidação do conhecimento.

As questões abertas são genuinamente problemáticas e assemelham-se à tarefa fundamental do trabalho científico de investigar problemas (Gil, 1992). Para as aulas de física, a proposta de construir enunciados abertos – para os quais não existe uma única resposta elaborada – proporciona a liberdade pela busca da solução e, conseqüentemente, pela busca do conhecimento, permitindo o entendimento do processo de construção e reorganização das ideias, característico da própria ciência.

Nessa perspectiva propor problemas abertos oportuniza situações privilegiadas para construir e aprofundar o conhecimento. A abordagem vem ao encontro de uma didática construtivista, que permite a participação efetiva do aluno no processo de ensino/aprendizagem.

Diante dessa didática, o professor tem um papel fundamental na aplicação da resolução de problemas abertos. A ele cabe questionar o pensamento desenvolvido pelo aluno, orientar e acompanhar o andamento das atividades, manter o aluno envolvido no processo, indagar e fomentar o debate a respeito das soluções encontradas.

De acordo com Pozo (1998, p.91):

Com essa tarefa, não são somente os professores que passam a conhecer as ideias implícitas que seus alunos possuem, mas o mesmo se aplica aos próprios alunos. Para isso, é muito importante o trabalho em grupo, a necessidade de argumentar e convencer. Mas também é essencial a tarefa do professor, induzindo uma maior precisão e diferenciação conceitual, sugerindo outros argumentos e, finalmente, agindo como mediador na aprendizagem e na tomada de consciência dos alunos acerca de suas próprias ideias.

Desta maneira, quando trabalhadas em grupos, as questões abertas promovem o diálogo, favorecendo a troca de informações, a argumentação e o esclarecimento de dúvidas, que, por vezes, os alunos solucionam entre si e sem a intervenção do professor. Para Vigotski, a colaboração e a interação social são fatores importantes no processo de ensino-aprendizagem. Conforme o autor:

Afirmamos que em colaboração a criança sempre pode fazer mais do que sozinha. No entanto, cabe acrescentar: não infinitamente mais, porém só em determinados limites, rigorosamente determinados pelo estado do seu desenvolvimento e pelas suas potencialidades intelectuais. Em colaboração, a criança se revela mais forte e mais inteligente que trabalhando sozinha, projeta-se ao nível das dificuldades intelectuais que ela resolve, mas sempre existe uma distância rigorosamente determinada por lei, que condiciona a divergência entre a sua inteligência ocupada no trabalho que ela realiza sozinha e a sua inteligência no trabalho em colaboração. (VIGOTSKI, 2001, p. 329).

Assim, percebe-se que o trabalho colaborativo oferece elementos de força e riqueza para a aquisição dos conceitos científicos em todas as idades.

A elaboração de enunciados abertos não exige a abordagem direta do conteúdo ou de conceito. Pode ser inspirada em uma propaganda, uma notícia ou uma reportagem, uma situação cotidiana etc. As possibilidades são inúmeras, contribuindo para desconstruir a abordagem encontrada em vários livros didáticos. A intenção é dispor de outras maneiras na apresentação dos enunciados na tentativa de aguçar e mudar o olhar do aluno sobre a disciplina. Portanto, estruturar um ensino baseado na resolução de problemas é planejar situações em que o aluno seja capaz de buscar estratégias para resolvê-las, que demonstre a aplicabilidade e a importância dos conceitos trabalhados.

É fundamental para que o aluno se aproprie dessa estratégia e também para que o professor consiga avaliar sua evolução, continuidade na resolução dos problemas, ou seja, o método não deve ser utilizado isoladamente. Segundo Goi (2004), o trabalho baseado em resolução de problemas só tem sucesso se o professor

utilizar a metodologia rotineiramente, para que se desenvolva esse hábito na rotina escolar.

Ademais, os problemas devem ser implementados com progressivo aumento do grau de dificuldade, assim, os primeiros problemas trabalhados têm como objetivo instruir o aluno para a metodologia. Nessa fase inicial, os problemas não oferecem grandes dificuldades conceituais. Posteriormente, na medida em que o aluno apodera-se do método e vai adquirindo confiança, desenvolvendo a autocrítica e adquirindo subsídios mais elaborados, os problemas tornam-se mais complexos.

É importante frisar que os aspectos considerados estão em consonância com a Teoria dos Campos Conceituais. Conforme Vergnaud (2013), o papel do professor é o de suscitar situações-problemas cuidadosamente selecionadas em nível crescente de complexidade para mediar e analisar a captação de significados por parte do aluno. Segundo Moreira (2002, p.7):

O papel do professor como mediador, provedor de situações problemáticas frutíferas, estimuladoras da interação sujeito-situação que leva à ampliação e à diversificação de seus esquemas de ação, ou seja, ao desenvolvimento cognitivo, deixa ainda mais evidente que a teoria de Vergnaud tem também forte influência vigotskyana.

Em outras palavras, é na ação que o sujeito aprende e desenvolve competências de acordo com a riqueza e a variedade das situações que lhe são oportunizadas.

Para Vergaud (2017, p.51):

O mediador tem assim a responsabilidade de escolher as situações para oferecê-la ao aprendiz, de clarificar a meta da atividade, de contribuir na organização desta atividade, incluindo a tomada da informação e o controle, de fazer emergir, de facilitar as inferências na situação.

Nesse sentido, é essencial a mudança pedagógica do professor, deixando de lado a postura do “detentor do saber” para adotar a atitude de orientador, que oportuniza condições num ambiente investigativo e colaborativo.

2.2. ORIENTAÇÃO PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS

No intuito de que a metodologia de resolução de problemas abertos seja significativa, é imprescindível a participação efetiva do aluno. Ou seja, que se envolva

na leitura e interpretação do problema, selecionando corretamente as informações pertinentes dentre as tantas encontradas, elaborando e sintetizando respostas, colaborando com os debates, expondo e argumentando suas ideias e construindo continuamente novos significados a partir dos estudos desenvolvidos.

Para tanto, é fundamental orientar o aluno para quais itens são necessários na resolução de problemas sem dados. O autor G. Polya, em seu livro *A arte de resolver problemas* (1995), apresenta algumas sugestões:

- a) Compreender o problema: Ler e reler o problema, percebendo claramente o que é necessário para reunir informações sobre o problema; O que se quer? O que é desconhecido?
- b) Delinear um plano: Selecionar as informações pertinentes e delinear como serão utilizadas. Quais informações são importantes? Como será resolvido?
- c) Implementação do plano: Executar o plano traçado para a resolução;
- d) Olhar retrospectivamente: o solucionador deve avaliar a solução obtida. Nenhuma informação foi deixada de lado? É possível encontrar outra resposta? É possível verificar o resultado? A retrospectiva é fundamental para análise e entendimento do problema.

A identificação das fases indica o caminho a ser percorrido, sentido que auxilia na resolução. Ademais, segundo Pozo (1998), durante a resolução do problema é vital:

- a) Habituar o aluno a tomar suas próprias decisões e refletir sobre elas, dando-lhe autonomia;
- b) Fomentar a cooperação entre os alunos, incentivar o debate sobre os diversos pontos de vista e analisar as soluções diferentes;
- c) Realizar um trabalho de apoio dirigido para fazer perguntas, ao invés de dar as respostas às perguntas dos alunos.
- d) Dessa forma, espera-se que o aluno tenha êxito na atividade, ressignificando sua aprendizagem.

2.3 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS POR INVESTIGAÇÃO

Dentre os objetivos dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) está previsto que o estudante desenvolva a habilidade de pesquisar, buscar informações e analisá-las. Propor questões abertas é oportunizar também uma aprendizagem por investigação, pois é necessário traçar um plano investigativo para solucionar a questão.

Para Pedro Demo (2015, p.9):

A pesquisa inclui sempre a percepção emancipatória do sujeito que busca fazer e fazer-se oportunidade, à medida que começa e se reconstitui pelo questionamento da realidade... Não é possível sair da condição de objeto, sem formar consciência crítica desta situação e contestá-la com iniciativa própria, fazendo deste questionamento o caminho de mudança.

O enfoque investigativo proporciona ao aluno compreender, relacionar e ressignificar os conceitos trabalhados em aula através da pesquisa, da análise da informação e da interpretação e organização do pensamento. Num outro sentido, ao professor possibilita o entendimento de como o aluno organiza e estrutura o seu conhecimento e quais são as dificuldades encontradas no processo. Assim, terá a oportunidade de orientar e influir no questionamento que remete à aprendizagem. De acordo com Aparecida Villatorre (2009, p.89):

A interação professor–aluno - conhecimento e ensino-aprendizagem deve ser compreendida como a conexão necessária e primordial para a estruturação e compreensão dos conceitos, pois a possibilidade de interrogar o processo de ensino-aprendizagem está no sujeito que ensina e no sujeito que aprende.

Desenvolver o ensino utilizando a pesquisa é ensinar o aluno a organizar e interpretar fatos, fazendo a reconstrução e a formulação individual dos fatos, não reproduzindo a prática da reprodução ou da cópia. Ou seja, desenvolver a capacidade do pensamento crítico, capaz de questionar e estabelecer relações com o mundo em que vive.

Para tanto, a orientação do professor é fundamental:

É tarefa do professor, principalmente, habituando-os a serem mais exigentes, sistemáticos e exaustivos na busca de informação relevantes, treinando-os em técnicas que permitam ter acesso a novas informações sempre que necessário e instruindo-os para analisar a relevância e a confiabilidade das fontes de informação. Ou seja, consistiria em induzir nos alunos uma mudança metodológica que vá além dessa metodologia da superficialidade que tendem a usar. (POZO, 1998, p. 95)

Nesse sentido, o ensino através de problemas abertos pode representar a elaboração de uma sequência didática significativa, problematizadora, contextualizada, que estimula a aprendizagem através do desenvolvimento da pesquisa, tão importante para a vida cotidiana, acadêmica e científica.

2.4 AVALIAÇÃO METODOLÓGICA

A avaliação deve ser entendida como parte do processo de ensino-aprendizagem. Deve ser parte constituinte do planejamento da aula e no decorrer das atividades, tendo por objetivo dimensionar o resultado do trabalho do aluno e o êxito da proposta realizada pelo professor. Para Villatorre (2009, p.64), a avaliação é um instrumento de diagnóstico que possibilita ao educador condições de compreensão do estágio em que o aluno se encontra e, de posse desta percepção, o professor poderá desenvolver estratégias para que o aluno alcance o conhecimento desejado. Dessa forma, além de servir ao aluno como referência para seu aprendizado, a avaliação é uma análise que norteia o trabalho do professor.

Igualmente para Pozo (1998), a avaliação deve ser um processo de análise e julgamento qualitativo do processo de aprendizagem, e não somente uma média do processo final. Portanto, é necessário avaliar todo o processo de construção do aluno. Nessa perspectiva, avaliar a resolução de problemas abertos implica analisar todo o processo de construção da resposta, examinando cada etapa da resolução, e não somente o resultado obtido ao fim do exercício. Avaliar apenas a resposta final é desconsiderar todo o percurso executado pelo aluno. O autor evidencia a importância de critérios detalhados que orientem a observação do professor durante o processo de resolução realizado pelos alunos.

De acordo com Harlen (1985) e Gil Pérez (1992), a avaliação da resolução dos problemas deve englobar os critérios de interpretação e compreensão do problema, a capacidade de formular hipótese, a postura investigativa, o desenvolvimento da aquisição de conceitos, o desempenho oral, a atitude colaborativa em grupo. A partir desses desses critérios, as práticas avaliativas estarão alicerçadas em analisar a trajetória do aluno.

2.5. RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS E A CONSTRUÇÃO DO CONHECIMENTO

A metodologia de resolução de problemas abertos permite a participação efetiva do educando no processo de construção do conhecimento, ou seja, é na ação e pela ação que o sujeito aprende. Aprende-se porque age para conseguir algo e, em um segundo momento, para se apropriar dos mecanismos dessa ação primeira. “Aprende-se no exercício de resolução e não porque alguém ensina, por mais que o ensino possa colaborar com essa atividade” (Becker 2012, p.36). Para tanto, o presente trabalho apoia-se em autores cognitivistas, como Vergnaud (1981), a Teoria de Campo Conceitual, e nas ideias de Ausubel (1980), a Aprendizagem Significativa.

De acordo com Vergnaud, o conhecimento está organizado em campos conceituais, que o sujeito se apropria ao longo do tempo por meio da experiência, da aprendizagem e da maturidade. O autor define campo conceitual como:

um conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição (VERGNAUD, 1998, p.141).

O conceito torna-se significativo através da variedade de situações e de problemas que o aluno encontra e progressivamente domina. Isso significa que a resolução de problemas, ou as situações de resolução de problemas, são essenciais para a contextualização e aquisição de conhecimento (MOREIRA, 2002).

Outro conceito fundamental para Vergnaud é o de esquema. O autor chama de esquema a organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações. Ou seja, através da ação, o sujeito desenvolve e adquire novos esquemas. Nesse sentido, cabe ao professor o papel fundamental de ajudar o aluno a ampliar e a diversificar seus esquemas, tornando-os capazes de enfrentar situações cada vez mais complexas. Para tanto, as situações devem ser enriquecedoras, diversificadas e dentro da zona proximal do aluno.

No intuito de atingir a zona proximal do aluno, é necessário identificar quais são suas concepções prévias, e tais concepções devem ser consideradas como precursoras dos conceitos científicos a serem adquiridos. De acordo com Moreira, as ideias de Vergnaud sobre os conhecimentos prévios assemelham-se aos de Ausubel e a Teoria da Aprendizagem Significativa.

Para Ausubel, o conhecimento prévio é o principal fator, que influencia a aquisição de novos conhecimentos. A aprendizagem significativa se caracteriza pela interação entre o novo conhecimento e o conhecimento prévio. É nessa interação que o novo conhecimento adquire significados e o conhecimento prévio se modifica ou adquire novos significados. (MOREIRA, 2011, p. 163)

A aprendizagem significativa ocorre quando uma nova informação se ancora em conceitos preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz e, na medida em que novos conceitos são aprendidos de maneira significativa, ocorre o crescimento e elaboração do subsunçores iniciais (Moreira, 2011). Desta forma, percebe-se que nas duas perspectivas teóricas – teoria de aprendizagem significativa e teoria do campo conceitual – os conhecimentos prévios dos alunos são fatores de relevância que facilitam e enriquecem o trabalho do professor, pois indicam o ponto de partida do seu trabalho.

Para Vergnaud, a concepção de Campo Conceitual é progressiva, e não substitutiva. Assim, o domínio de certo Campo Conceitual é um processo lento e progressivo. Portanto, uma aula expositiva, com a apresentação de teorias, mesmo que de maneira clara, objetiva e organizada, pode ser insuficiente para a aprendizagem. O autor chama essa prática de “ilusão pedagógica”, porque é através de situação de resolução de problemas que os conceitos se desenvolvem e através dessas situações que os conceitos se tornam significativos para o aluno. Cabe observar que, embora a resolução de problemas seja essencial para a conceitualização, de acordo com Vergnaud, “um problema não é um problema para um indivíduo a menos que ele tenha conceitos que o tornem capaz de considerá-lo um problema para si mesmo”. (2002, p.25)

Novamente, é fundamental conhecer as concepções prévias do aluno no intuito de fornecer situações ou problemas que despertem seu interesse em resolvê-las, pois situações já conhecidas ou compreendidas de nada contribuem para o processo desejado. Inversamente e no mesmo sentido, situações demasiadamente complexas contribuem para o desânimo ou desistência da atividade. Nas palavras de Moreira (2002, p.27):

Quando uma classe de problemas é resolvida por um indivíduo (o que significa que ele ou ele desenvolva um esquema eficiente para lidar com todos ou quase todos os problemas dessa classe), o caráter problemático dessa classe específica desaparece. Mas essa competência desenvolvida pelo indivíduo o habilita a reconhecer ou considerar novos problemas para si mesmo, trata-se então, de um processo cíclico.

Portanto, o domínio de um campo conceitual não é um processo rápido, mas as dificuldades serão superadas na medida em que forem enfrentadas. A resolução de problemas também tem um papel de destaque na Aprendizagem Significativa:

Para Ausubel, a resolução de problemas, em particular de situações problemáticas novas e não familiares que requerem máxima transformação do conhecimento adquirido, é a principal evidência da aprendizagem significativa. (MOREIRA, 2002)

Outro fator de relevância na Aprendizagem Significativa é a linguagem, ou seja, uma vez aprendido determinado conceito, o aluno conseguirá explicá-lo com suas próprias palavras. Segundo Ausubel:

A linguagem clarifica os significados, tornando-os mais precisos e transferíveis. O significado emerge quando é estabelecida uma relação entre a entidade e o signo verbal que a representa. A linguagem tem, então, um papel integral e operacional na teoria e não meramente comunicativo. (MOREIRA, 2002, p 72)

Dessa maneira, oportunizar e estimular momentos que permitam a oralidade do estudante é fundamental, porque através da fala o aluno consegue expressar sua compreensão sobre determinado conceito, demonstrando ao professor quais conceitos foram assimilados. Na apresentação de resultados através da escrita, algumas vezes, essa demonstração é ocultada pela transcrição do conceito sem compreensão. Assim, a aprendizagem de resolução de problemas permite desenvolver várias habilidades que oportunizam aprendizagens significativas, permitindo cada vez mais autonomia ao aluno sobre as formas de resolução.

3 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Normalmente, a abordagem dos conteúdos de física no ensino médio obedece à seguinte sequência: mecânica, física térmica, óptica, ondulatória e eletromagnetismo. Entretanto, a física moderna raramente é trabalhada até o final do terceiro ano em razão do número de aulas e da quantidade de conteúdo. Dessa maneira, o entendimento dessa área do conhecimento torna-se superficial ou inexistente. Buscando melhorar este aspecto, o presente trabalho tem o objetivo de desenvolver os conceitos de física moderna e proporcionar aos alunos a compreensão dos avanços tecnológicos da atualidade. Além disto, visa a contribuir para o entendimento da ciência enquanto construção humana, mostrando que a física moderna surgiu pela necessidade de elucidar fenômenos que a física clássica não explica.

Nesse sentido, uma abordagem contextualizada e inovadora sobre os conceitos da física moderna poderá contribuir para a aprendizagem significativa e a alfabetização científica apropriada aos nossos dias. Para tanto, será utilizada a metodologia de resolução de problemas abertos como estratégia para desenvolver os conteúdos e, dessa forma, contribuir para aumentar o interesse dos alunos pela disciplina, modificando a atitude passiva normalmente evidenciada através desta aprendizagem.

Neste sentido, os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Elaborar situações-problema mais próximas da realidade dos alunos;
- b) Estabelecer relações entre os fenômenos da física moderna e as tecnologias do cotidiano;
- c) Desenvolver nos alunos habilidades de elaborar argumentos, formular hipóteses e trabalhar em grupo;
- d) Estimular a autonomia dos alunos para a criação e a resolução de problemas;
- e) Testar a estratégia como aprendizagem significativa;
- f) Contribuir para aumentar o interesse dos estudantes pelos conhecimentos da física.

A sequência didática foi desenvolvida em uma turma de 3º ano do Ensino Médio. A escola faz parte da rede estadual de ensino e é localizada na região central de Porto Alegre, contemplando o Ensino Médio e o técnico profissionalizante. A turma

é composta de alunos de vários bairros do município, e 60% deles trabalham no contraturno. Os alunos demonstram pouco ou nenhum interesse a respeito de processos seletivos, como Enem e o vestibular na UFRGS.

Para o desenvolvimento do produto educacional, os alunos foram orientados para organizar grupos de trabalho por afinidade pessoal e instruídos que mantivessem os grupos até o final do trabalho. Para a resolução dos problemas abertos, os alunos utilizaram a biblioteca e o laboratório de informática da escola. A utilização desses espaços foi fundamental, porque a atividade previa realização de pesquisas diversas.

A internet é uma ferramenta muito importante. É um recurso que permite muitas possibilidades e descobertas úteis para o trabalho aos estudantes. Porém, é necessário cuidado no uso da ferramenta. Na ocasião, os alunos foram orientados a acessarem *sites* de instituições de pesquisa, de revistas científicas, de universidades. Quando trabalhamos a Resolução de Problemas, os alunos puderam utilizar a internet como ferramenta de pesquisa, para que desenvolvessem o hábito de aprender, de forma ativa, como pesquisar, observando a fidedignidade das páginas consultadas.

Metodologicamente, a sequência didática foi dividida em seis momentos. Essa organização teve por objetivo melhor avaliar a evolução dos alunos na execução da atividade. Os momentos foram os seguintes:

1º momento: Trabalho com os organizadores prévios através de um questionário investigativo (apêndice B). De acordo com a estratégia proposta por Ausubel, os organizadores prévios são “pontes cognitivas”, ou seja, materiais introdutórios que permitem ao professor perceber quais são os conhecimentos dos alunos acerca do assunto e a partir desta informação sanar carências evidenciadas.

Na sequência, foi realizada a leitura e o debate do artigo *O início de uma moderna revolução, da revista: Ciência Hoje* (Oliveira, 2009) (anexo A). O artigo faz uma revisão histórica, social e científica do contexto do início do século XX, tratando todos os aspectos de contribuíram para o surgimento da Física Quântica. Assim, oportuniza a compreensão da ciência como construção humana, que se desenvolve através de atitudes críticas e reflexivas da sociedade.

2º momento: Início da resolução de problemas. A organização da estratégia didática ocorreu através da exposição oral sobre determinado assunto, utilizando-se

textos de apoio (Apêndice C - F). Os textos de apoio reúnem trechos selecionados de livros didáticos diversos de Física do Ensino Médio. Depois da exposição, foram entregues os problemas abertos, sendo que os grupos receberam problemas diferentes. No momento da resolução dos problemas, foi disponibilizado o laboratório de informática e acesso a biblioteca, para os grupos acessarem a internet ou consultarem os textos de apoio.

Foi importante estabelecer um intervalo de tempo entre o momento da resolução dos problemas e as apresentações das resoluções por parte dos alunos para que os grupos pudessem melhor refletir as soluções que encontraram e se organizarem para a exposição dos resultados. Assim, os grupos apresentaram as soluções das questões sempre na semana seguinte às resoluções.

Na aula destinada à apresentação dos problemas, cada grupo deveria ler um problema e comentar sua resolução. Após as apresentações, as soluções dos problemas foram debatidas no grande grupo, objetivando explorar as respostas dos problemas e retomar os conceitos trabalhados na aula expositiva, estabelecendo relações entre o conceito e suas aplicabilidades.

O objetivo dos primeiros problemas foi trabalhar com os conceitos da Física clássica, como o modelo ondulatório para as radiações eletromagnéticas, a radiação térmica e o conceito de corpo negro. Tais conceitos servem para sanar possíveis lacunas de Física clássica e iniciar os estudos de Física moderna.

3.1 PROBLEMAS RELACIONADOS À TEORIA QUÂNTICA

- 1) Em um determinado local da superfície interna do bulbo de vidro de uma lâmpada de incandescência instalada em um soquete fixo, surge, após muito tempo de uso, uma mancha escura e com certo espelhamento. Qual é a origem dessa mancha? (GUALTER; NEWTON; HELOU, v. 3, 2013, p. 283)
- 2) Partindo do fato de que todos os corpos irradiam energia, explique por que normalmente não conseguimos enxergar pessoas e alguns corpos no escuro? (GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, v. 3, 2016, p.205)
- 3) Entre as várias linhas de estudo da matéria como: composição, estrutura, temperatura, alguns cientistas investigam a maneira como a matéria absorve e emite luz. Esses estudos também contribuem para o

entendimento acerca da estrutura da matéria. O padrão característico de comprimento de onda emitido por uma fonte luminosa é chamado espectro. A maioria das informações que temos sobre as galáxias e estrelas vem do estudo dos seus espectros. Imagine-se no ano de 1868, você é um astrofísico e faz parte de uma equipe de pesquisadores que acaba de descobrir um novo elemento químico nunca antes observado na Terra. Compartilhe essa experiência com seus colegas: como ocorreu a descoberta desse elemento, qual é o elemento e como é possível afirmar que o elemento ainda não foi detectado na Terra?

- 4) Alguns detergentes de roupas anunciam que seus produtos deixam as roupas ainda mais brancas, mas isso se trata, realmente, de limpar profundamente o tecido e eliminar manchas por completo?
- 5) O mar e o céu aparentam ser azuis na maior parte do tempo, pois o ar atmosférico reemite, fundamentalmente, a componente azul da luz solar. Assim, a cor de um objeto está relacionada com o comprimento de onda reemitido (espalhado), inicialmente interpretado como o resultado dos processos de absorção e a reflexão da luz. A afirmação muito comum de que os corpos negros não emitem luz é verdadeira? Justifique sua resposta.

3º momento: Neste terceiro momento, foram trabalhados os problemas sobre o efeito fotoelétrico. As questões foram trabalhadas por ordem de complexidade. A atividade foi iniciada com o problema que debate o conceito inicial da teoria quântica, seguido da análise da constante de Planck e as aplicações do efeito fotoelétrico para a sociedade. Então, foram abordados os conceitos de função trabalho através de problemas que debatem a frequência da radiação incidente.

3. 2 PROBLEMAS SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO

- 1) Pela explicação do efeito fotoelétrico e por suas contribuições para a Física teórica, Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921. Por que tais ideias revolucionaram a física do século XX? Quais foram as contribuições do postulado?

- 2) Max Karl Ernst Planck (1858-1947) foi um alemão e físico respeitado por suas contribuições na área da termodinâmica. Realizado em 1900, seu trabalho sobre radiação térmica é considerado o marco de surgimento da física quântica. Para solucionar o problema da radiação térmica, Max Planck utilizou de uma constante em sua publicação. Esta constante, denominada constante de Planck, passaria a ser a marca da nova física que estava surgindo. A constante de Planck, h , é uma das constantes fundamentais da física, como a velocidade da luz, c , e da gravidade, G , dentre outras. Por que a constante de Planck é considerada um marco para a Física Moderna?
- 3) De acordo, com a teoria de Planck, a energia é emitida em quantidades determinadas de frequências. Como o espectro da radiação térmica emitido por um corpo pode ser contínuo?
- 4) O entendimento do efeito fotoelétrico possibilitou grandes avanços tecnológicos. Hoje está presente em várias aplicações cotidianas. Busque entender e explicar três aplicações do efeito fotoelétrico.
- 5) O entendimento do efeito fotoelétrico possibilitou grandes avanços tecnológicos. Hoje presente em várias aplicações do cotidiano. Explique como o efeito fotoelétrico é utilizado para abrir portas automáticas quando alguém se aproxima?
- 6) Que relação pode ser feita entre o efeito fotoelétrico e a fotossíntese? A cor verde das folhas tem algum significado? Explique. (GASPAR, v. 3, 2014, p.2013)
- 7) Por que seria impossível para um material fluorescente emitir luz ultravioleta quando iluminado por luz infravermelha?
- 8) O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá por mais intensa que seja a radiação. Por que existe frequência de corte para o efeito fotoelétrico? (Parcialmente extraído, GUALTER; NEWTON; HELOU, v. 3, 2013, p. 275)
- 9) O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá, por mais intensa que seja a radiação, com a exceção dos metais alcalinos (sódio, potássio, lítio etc.),

todos os outros metais requerem frequências iguais ou superiores à radiação ultravioleta para que o fenômeno ocorra. Por que os metais alcalinos são exceção neste fenômeno? (Parcialmente extraído, GUALTER; NEWTON; HELOU, v. 3, 2013, p. 275)

4º momento: Através dos problemas, foram retomados os conceitos de radiação do corpo negro, quantização da energia, efeito fotoelétrico e tratados as ideias do modelo atômico de Bohr, e o espectro de emissão e absorção foi explicado.

3.3 PROBLEMAS DE ESPECTRO DE ABSORÇÃO E DE EMISSÃO – MODELO ATÔMICO DE BOHR

- 1) Com base no átomo de Bohr, o que ocorre quando um fóton incide sobre um átomo e por que nos átomos os elétrons não perdem energia continuamente e terminam absorvidos pelo núcleo?
- 2) Na virada do século XIX para o século XX, ocorreu grande empenho dos cientistas para estudar o corpo negro. Por que tal empenho? Quais são as contribuições desse estudo para a sociedade?
- 3) Com todas as opções modernas e mais eficientes de lâmpadas lançadas nos últimos anos, a lâmpada incandescente pode ter perdido parte de sua popularidade, mas continua sendo uma das maiores invenções de Thomas Edison. Em 1879, uma lâmpada feita com algodão carbonizado dentro de um bulbo a vácuo brilhou por 45 horas seguidas e representou o início da “**Era da Eletricidade**”, substituindo o uso de velas, lampiões a gás e tochas de madeira. (Extraído da revista Galileu 14/02/2017)
Ao observar os vários modelos de lâmpadas que existem atualmente e comparando a luminosidade de uma lâmpada fluorescente e uma lâmpada de LED de mesma potência, percebe-se que a lâmpada de LED tem uma luminosidade maior. Por quê?
- 4) Antes do advento das modernas teorias de interação radiação-matéria, como a descrita pelo modelo de Boltzmann, os físicos chamavam de espalhamento o efeito de desvio das trajetórias de partículas, provocados por colisões com alvos massivos. Por exemplo, quando você inicia uma

partida de sinuca jogando a bola branca sobre da mesa inicialmente juntas, está causando o espalhamento das bolas na mesa de sinuca. Em 1923, observou-se um interessante efeito. Ao incidirem ondas eletromagnéticas, tais como raios-X ou gama sobre um elétron, este sofria um espalhamento. Que propriedade das ondas eletromagnéticas, descobertas no início do século XX, estava sendo observada indiretamente? Explique.

- 5) Max Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918 por descobrir que a energia é quantizada. Do ponto de vista prático, existem diversas evidências de que a energia é de fato quantizada. Basta considerar, por exemplo, o fenômeno de mudança de fase. Neste sentido, por que a água, ao ser aquecida, entra em ebulição (fervura), em vez de expandir continuamente até atingir o estado de vapor?

5º momento: A finalidade dos últimos problemas foi abordar os conceitos da dualidade onda-partícula e ampliar o debate sobre os conceitos da aplicabilidade da Física Quântica na sociedade. Como pode ser observado, a complexidade dos problemas aumentou progressivamente a cada etapa.

3.4 PROBLEMAS SOBRE DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

- 1) A luz, ou melhor, nossas tentativas de compreender seus mistérios, tem uma nobre história. Em 1905, Albert Einstein, então com apenas 26 anos, propôs algo inusitado, que contrariava o senso comum da época. Einstein explicou o efeito fotoelétrico adotando um novo modelo para a luz e as demais radiações eletromagnéticas. Ao explicar fenômenos naturais, Einstein mostrou que a natureza é muito mais estranha do que podemos supor. (Extraído da Revista Galileu 09/06/2016)

Quais evidências comprovam a natureza ondulatória da luz e da natureza corpuscular da luz? Exemplifique.

Por que as fotografias de um livro ou revistas parecem granuladas quando são ampliadas?

- 2) Estufas são recintos fechados com paredes e teto transparentes a luz. As de vidro são utilizadas principalmente em países de inverno rigoroso para o cultivo de verduras, legumes e flores. Por que o vidro é transparente à luz visível e parcialmente opaco às ondas de calor?
- 3) Não se sabe ao certo quando surgiram as primeiras lentes. A partir do século XIII, porém, iniciou-se na Itália sua fabricação regular. As lentes são um componente óptico de vital importância, participando individual ou coletivamente de quase todos os instrumentos ópticos. Ao observar uma lâmina de vidro fina ou uma mais espessa, percebe-se diferença em suas tonalidades. Por que as lâminas finas são translúcidas, e as espessas são suavemente esverdeadas?
- 4) Existem características químicas e físicas comuns a diferentes elementos. Por que os materiais bons condutores de calor também são bons condutores de eletricidade?
- 5) Os polímeros são utilizados desde a antiguidade pela humanidade. Utilizou-se como revestimento impermeabilizante, aumentando a durabilidade dos móveis por várias décadas. Os processos para a obtenção sintética dos polímeros foram possíveis a partir do século XX. A grande diversidade e aplicação do material revolucionou a indústria. É possível existir polímeros condutores? Explique.
- 6) Uma das grandes fontes da radiação ultravioleta é o Sol. Assim, para os dias de veraneio na praia, é fundamental a escolha correta do guarda-sol. Imagine-se em uma loja para comprar um guarda-sol, quais modelos escolher para filtrar os raios ultravioletas e por que tais modelos filtram os raios?

6º momento: A última etapa da metodologia iniciou com um debate visando a retomar os conceitos já trabalhados e estabelecer conexões entre teoria e aplicabilidade. Após a discussão, foi entregue e solicitada a resolução do segundo questionário investigativo. Esse retoma algumas questões abordadas no primeiro questionário e explora novas ideias. Essa atividade teve dois objetivos. O primeiro foi analisar a contribuição da metodologia para a construção do conhecimento, e o segundo, demonstrar isso ao próprio aluno, pois, algumas vezes, o aluno se sente desmotivado por não conseguir perceber seus avanços. Assim, ao entregar os dois

questionários, ele poderá comparar suas respostas iniciais e finais, assim como perceber seu desenvolvimento. Isso é fundamental para elevar a sua autoestima e incentivá-lo a prosseguir nos estudos. Por último, foi solicitada a elaboração, resolução e apresentação de um problema por grupo. O objetivo disso foi verificar se a metodologia colabora para desenvolver a habilidade de formular problemas.

4 AVALIAÇÃO

A avaliação do produto educacional ocorreu da seguinte maneira: participação do aluno na resolução do problema, análise de todas as etapas de resolução, apresentação da resolução para a turma, entrega de um relatório escrito e participação dos debates realizados em aula. Dessa maneira, foram avaliados os seguintes quesitos:

- a) Identificação do problema (compreender o problema);
- b) Formulação de hipóteses acerca do mesmo, como se organizou para realizar a pesquisa (delinear um plano);
- c) Exploração de diferentes caminhos de resolução, ou seja, coletou informações de diferentes fontes;
- d) Avaliação da solução (olhar retrospectivamente);
- e) Qual a conclusão do grupo para o problema;
- f) Participação ativa nos debates em aula.

Os critérios “a-d” de avaliação são baseados nos autores G. Polya, *A arte de resolver problemas* (1995), e Juan Ignacio Pozo, *A solução de Problemas* (1998).

Os conceitos atribuídos pela escola, na qual o produto educacional foi implementado, são os seguintes:

- A –excelente** construção de conceitos e habilidades;
- B - boa** construção de conceitos e habilidades;
- C –está em** construção de conceitos e habilidades;
- D – restrição** na construção de conceitos e habilidades.

Com base nesses conceitos, organizou-se a seguinte tabela avaliativa:

Quadro 1 - Critérios para atribuição de conceitos

Critérios	Conceito A	Conceito B	Conceito C	Conceito D	Não fez
Identificação do problema	O grupo conseguiu identificar o problema	O grupo apresentou dificuldade para identificar o problema	O grupo não identificou o problema e precisou de ajuda	Alguns componentes do grupo trabalharam para identificar o problema	Alguns componentes do grupo trabalharam para identificar o problema com ajuda
Formulação de hipóteses	Todos os componentes do grupo buscaram informações para serem discutidas	Nem todos os participantes ajudaram na busca de informação	Todos participaram na busca de informações, mas precisaram de orientação para efetuar a pesquisa	Apenas uma minoria realizou a atividade com ou sem orientação	O grupo não realizou a atividade
Exploração de diferentes caminhos	O grupo pesquisou em diferentes fontes de informações e analisou as informações	O grupo pesquisou em diferentes fontes. Porém, precisou de ajuda para analisar as informações	O grupo pesquisou em apenas uma fonte de informação.	Apenas uma minoria realizou a pesquisa em uma ou mais fontes.	O grupo não realizou a atividade
Avaliação da solução	Todos os componentes do grupo avaliaram as informações e chegaram à solução	Chegaram à resposta do problema, mas não a interpretaram corretamente	Chegaram à uma resposta incompleta. Não conseguiram resolver totalmente	Não conseguiram responder o problema	Não resolveram o problema
Conclusão do grupo	Apresentaram de forma coerente, explicaram todos os dados necessários	Apresentaram de maneira confusa. Sem interpretar o problema	Apenas leram sem chegar à conclusão e solução completa do problema.	Apenas leram sem chegar a uma conclusão e sem chegar à solução do problema.	Faltaram à apresentação ou estavam presentes, mas não apresentaram
Participação nos debates	Os componentes do grupo participam efetivamente dos debates	Alguns componentes participam dos debates.	Participam esporadicamente dos debates	Alguns participam esporadicamente dos debates	Não participam dos debates

Fonte: elaborado pela autora.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

É importante relatar o conjunto das atividades, assim como apresentar os resultados obtidos com a aplicação do produto educacional. As observações baseiam-se na análise do questionário investigativo e no relato das aulas e na avaliação da resolução dos problemas abertos realizados pelos grupos. Nesse momento, o principal objetivo é analisar a contribuição do produto para a aquisição de novos conhecimentos de maneira significativa. Nesse sentido, é fundamental o avanço do aluno durante o processo.

1º Planejamento

No primeiro dia, foi exposta a proposta de implementação do produto educacional e constatou-se grande entusiasmo dos alunos sobre os assuntos a serem trabalhados. No mesmo período, com o propósito de que os alunos externassem seus subsunçores prévios, foi aplicado o questionário investigativo e elucidado que a proposta da atividade é uma investigação didática e não avaliativa. Para tanto, foi estabelecido que as respostas fossem individuais e sem consulta a qualquer material didático. Na ocasião, 14 alunos estavam presentes e responderam ao questionário.

A seguir, a análise dos resultados obtidos no questionário investigativo:

1º) Na primeira pergunta, um número significativo de alunos não conseguiu explicar a diferença entre esses dois ramos de estudos da física, outros confundiram física clássica com o que era estudado anteriormente e a física moderna com o que se estuda hoje; um terceiro grupo não explicou, mas construiu exemplos corretos sobre a utilização dos conceitos;

2º, 3º) Embora a segunda e a terceira questões sejam distintas, percebe-se certa semelhança nas respostas. Alguns associaram corretamente a palavra “quantum” como quantidade, mas não conseguiram definir a que se refere; outros associaram a palavra “quântica” com quantidade também. Outro grupo a definiu como a quantidade de elementos químicos, e alguns desconheciam os assuntos;

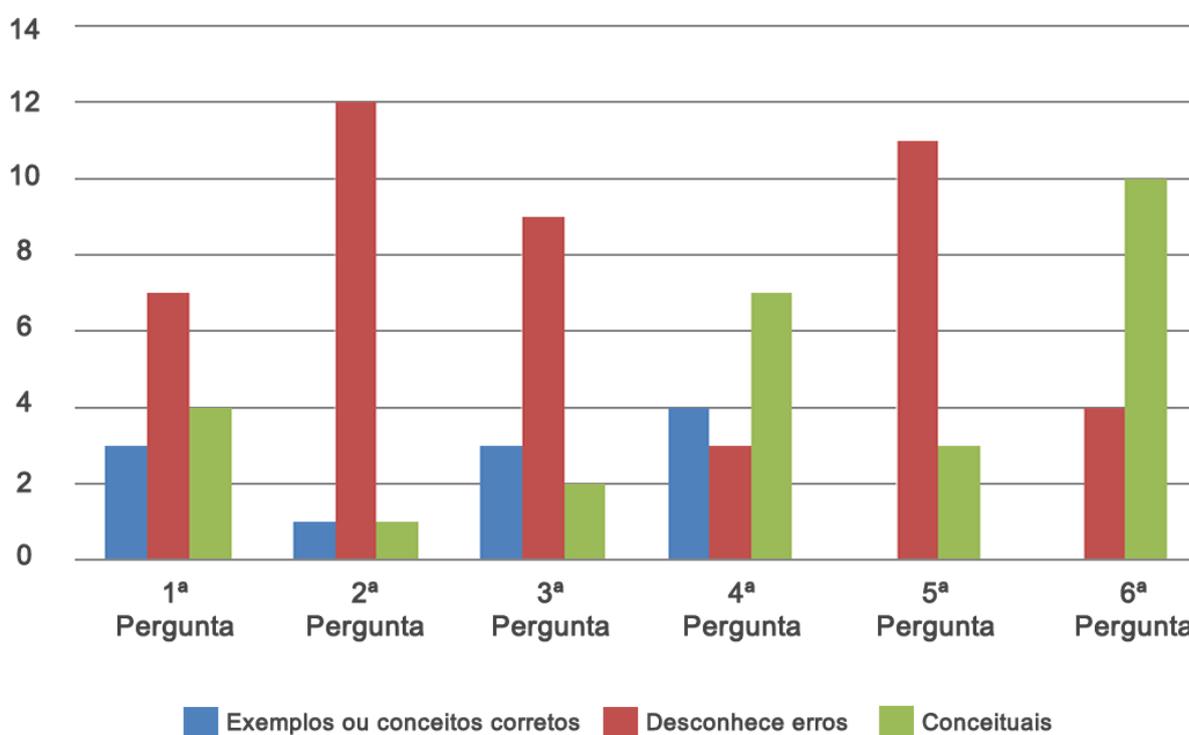
4º) Na quarta pergunta feita aos alunos, eles demonstram conhecer a relação entre o sensor fotoelétrico e o calor transmitido pelo corpo, outros relacionam com a capacidade do sensor captar o movimento do corpo, e um terceiro grupo relacionou

calor e movimento. Também houve alunos que não conseguiram formular qualquer explicação;

5º) Muitos alunos desconheciam o assunto, e alguns explicaram a identificação química pelo formato e aparência. Outros citaram a observação através de telescópios;

6º) A última pergunta obteve o maior índice de erro conceitual nas respostas. Alguns responderam que pela observação de telescópios ou satélites é possível identificar a composição química das estrelas, porém não conseguiram explicar como essa informação é analisada. E outros relacionaram o tamanho *versus* a distância.

Gráfico 1 - Desempenho dos alunos no 1º questionário



Fonte: elaborado pela autora.

Como se pode perceber, o questionário investigativo é um enriquecedor material didático, que será retomado ao longo da aplicação do produto para ressignificar e aprofundar os conceitos dos alunos.

2º Planejamento

Como o segundo período não se desenvolveu na sequência do primeiro, houve tempo de realizar a leitura do questionário e, de posse da informação, foi lido e debatido o artigo *O início de uma moderna revolução*, Ciência Hoje. O artigo, publicado em outubro de 2009, trata dos aspectos históricos, culturais e sociais que cercaram o surgimento da física quântica, e a leitura permitiu aos alunos a compreensão inicial dos diversos contextos que levaram ao surgimento da física moderna. O texto também aborda as indagações iniciais do questionário investigativo, e o momento foi utilizado para pontuar e debatê-las. A turma participou ativamente dessa atividade.

3º Planejamento

No terceiro momento, foram aprofundados os aspectos físicos e históricos que colaboraram para o surgimento da Física moderna. A aula foi iniciada com a entrega do texto de apoio (Apêndice C), depois, foram utilizados como recurso didático *slides* organizados com base no texto de apoio, que também foi utilizado na produção de um texto síntese distribuído aos alunos. A seguir, foi realizada uma pequena revisão sobre o espectro eletromagnético tendo por objetivo rever os componentes de luz do espectro e os conceitos de frequência e comprimento de onda, estudados no 2º ano no conteúdo de ondulatória. Em seguida, foram tratados o conceito de radiação do corpo negro e a incompatibilidade entre os resultados experimentais e as previsões decorrentes com a Física Clássica para o espectro de emissão do corpo negro. Nesse momento, várias dúvidas surgiram sobre o conceito de luz e energia; depois de sanadas, foi explicada a contribuição de Planck para a catástrofe do ultravioleta. Já nos instantes finais da aula, a questão 5 do questionário foi retomada, reforçando novamente o estudo da espectroscopia.

Após a aula expositiva, os alunos foram solicitados a organizarem grupos de afinidade para melhor rendimento na resolução dos problemas. Cinco grupos foram criados, dois com quatro componentes e três com três componentes. Neste momento, foram entregues os primeiros problemas abertos, e os alunos, encaminhados para o laboratório de informática. Então ocorreu o primeiro contato dos alunos com a

metodologia, e cada grupo recebeu um problema diferente. No decorrer da pesquisa, alguns grupos solicitaram verificar se as respostas estavam certas e para cada questionamento do grupo formulou-se outra pergunta com resposta, pois o principal objetivo da metodologia é desenvolver o hábito da investigação, de formular hipóteses na busca de sanar as dúvidas e desconstruir a prática do aluno de esperar pela resposta do professor, ou seja, desenvolver ao longo do tempo sua autonomia. No final do período, todos os grupos mostraram o trabalho de pesquisa concluído, dois grupos precisavam terminar a organização das informações coletas e formular a conclusão.

4º Planejamento

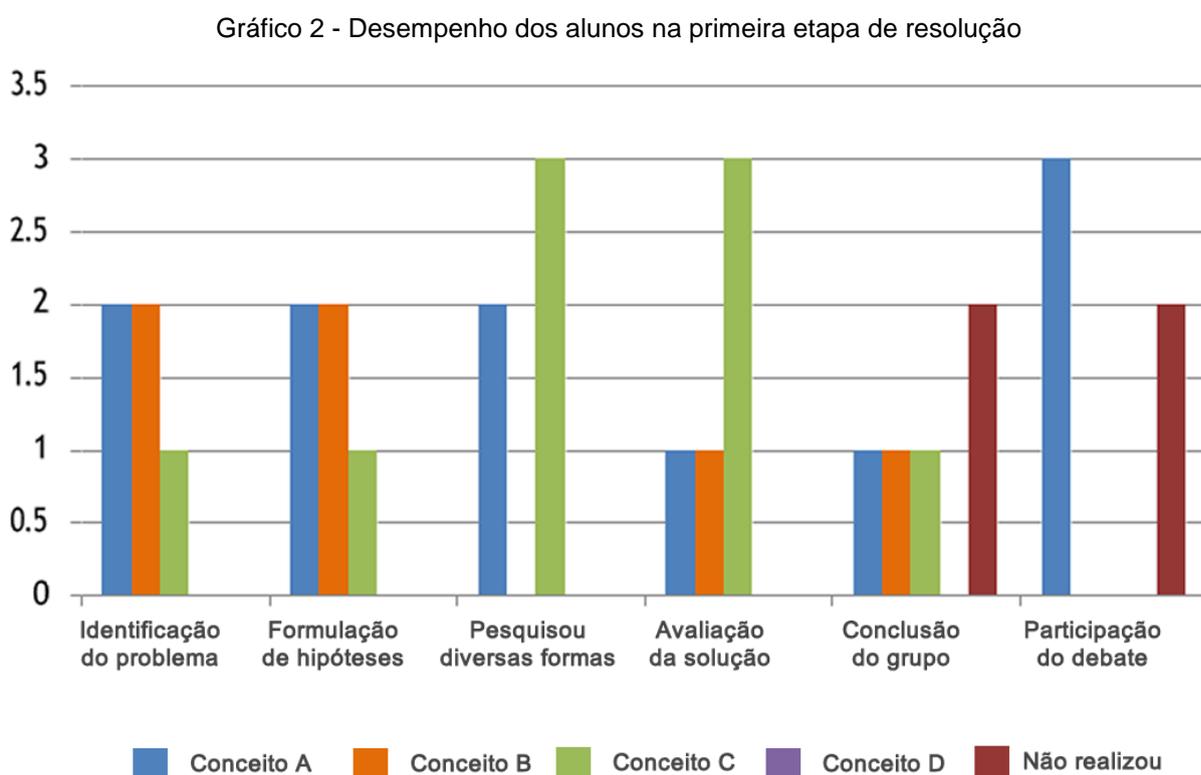
Na semana seguinte, dois períodos foram destinados à apresentação dos problemas, e os conteúdos das resoluções estimularam o debate posterior. Para alcançar o conceito “A”, cada grupo deveria desenvolver a competência de pesquisar e, de acordo com o problema proposto, analisar a seguinte ideia:

No primeiro problema, o objetivo central era a liberação de átomos de tungstênio devido ao aquecimento do filamento, considerando o conceito de *quantum* e a emissão de porções discretas de energia. O Grupo A resolveu o problema e obteve êxito máximo na atividade. No segundo problema, era essencial a compreensão do espectro eletromagnético e a análise da região do infravermelho. O Grupo B chegou a uma conclusão incompleta do problema e não apresentou a solução. O terceiro problema retomou o entendimento estudo da espectroscopia. O Grupo C resolveu o problema, porém apresentou dificuldade de interpretação da resposta. Já a quarta questão considerava os conceitos de fosforescência e fótons de absorção e emissão de energia. O Grupo D encontrou dificuldades na interpretação do problema ao tentar resolver a atividade e, conseqüentemente, não conseguiu resolvê-lo totalmente. O último problema abordava o conceito de corpo negro e ondas eletromagnéticas. O Grupo E o resolveu de maneira incompleta, pois não conseguiu justificar a resposta e não apresentou sua solução.

Faz-se necessário destacar que através dos problemas, os assuntos trabalhados no segundo e no terceiro períodos de aulas foram novamente retomados

e debatidos, oportunizando a consolidação dos mesmos e mostrando suas aplicações em diversos assuntos.

Nesse dia, dois grupos faltaram à atividade e, por esse motivo, no gráfico 2, percebe-se baixo rendimento na conclusão do trabalho. Então, a professora realizou a leitura e o debate dos problemas não apresentados. O gráfico abaixo mostra o panorama de desempenho de cada grupo na resolução dos problemas e na participação no debate.



Fonte: elaborado pela autora.

5º e 6º Planejamentos

Nesse momento, foi tratado o efeito fotoelétrico. No início da aula, abordaram-se as primeiras observações dos fenômenos, após foram destacadas as incoerências entre as observações do evento com as tentativas de explicá-lo utilizando os conceitos da física clássica, retomando, novamente, as observações do efeito fotoelétrico e as colaborações de Albert Einstein para elucidá-lo. O texto de apoio utilizado nessa aula encontra-se no (Apêndice D). Após as explicações, os grupos, que deveriam continuar com os mesmos integrantes da primeira atividade, receberam

os problemas. Nesse dia, a escola estava sem sinal de internet, mas os alunos puderam consultar o material bibliográfico para a pesquisa.

Com o objetivo que recuperar o desempenho de alguns grupos que apresentaram maior dificuldade na atividade anterior, seus integrantes tiveram a oportunidade de receber dois problemas com diferentes níveis de dificuldades. Cada problema tinha os objetivos e complexidades diferentes. Para obter o conceito “A”, era necessário o entendimento dos seguintes aspectos:

O primeiro problema tem o objetivo de discutir a explicação do efeito fotoelétrico através das concepções da física moderna. Esse problema, de fácil compreensão, foi entregue ao Grupo B, que apresentou maior dificuldade na resolução anterior, mas obteve pleno êxito na resolução nessa outra oportunidade.

A segunda questão trata do significado físico e histórico da constante de Planck. O Grupo D solucionou o problema de maneira coerente. Porém, novamente, apresentou dificuldade na interpretação da solução do problema.

O terceiro problema trata a relação entre a quantização da energia e a percepção de energia contínua. O Grupo C, ao resolver essa atividade, apresentou dificuldades em interpretar o problema e, conseqüentemente, não conseguiu resolvê-lo totalmente, obtendo o mesmo desempenho que na atividade anterior.

O quarto problema aborda as contribuições do entendimento do efeito fotoelétrico à sociedade e a compreensão das células fotoelétricas. É um problema de fácil compreensão e por esse motivo foi entregue ao Grupo C, que alcançou êxito total na resolução, superando as dificuldades anteriores.

A quinta questão tem o objetivo de retomar a pergunta elaborada no questionário investigativo e sua compreensão, ou seja, entender o funcionamento dos sensores de luz. O Grupo E resolveu a problema de maneira incompleta, pois não conseguiu justificar sua resposta e não apresentou a solução do problema. Em realidade, manteve o desempenho da atividade anterior.

O sexto problema trata da frequência necessária para obter o efeito fotoelétrico. Essa questão também foi entregue ao Grupo B, que novamente obteve conceito máximo na resolução.

O sétimo problema aborda a relação entre a energia da radiação incidente e sua frequência. O Grupo D conseguiu resolver o problema de maneira coerente, porém apresentou dificuldades na interpretação da resposta.

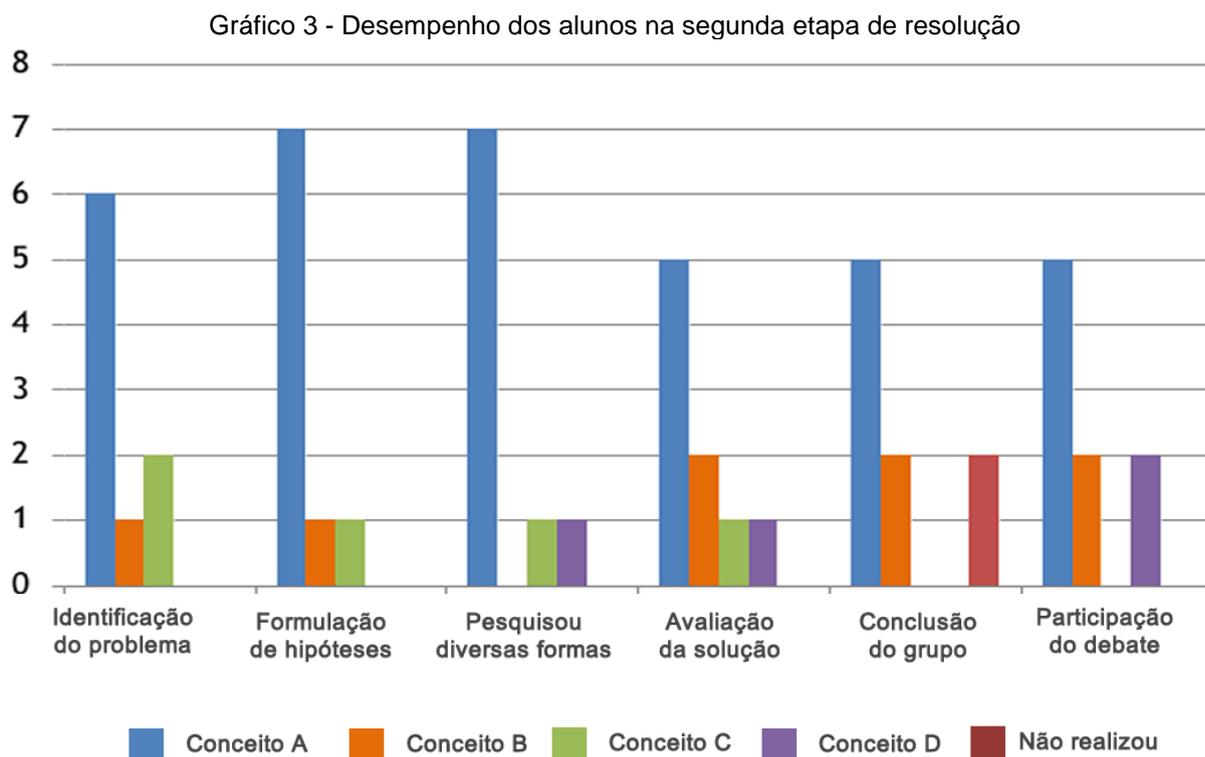
A oitava questão debate a função trabalho no efeito fotoelétrico. O Grupo E resolveu o problema de maneira incompleta, pois não conseguiu justificar sua resposta e não apresentou a solução do problema. Ou seja, manteve o desempenho da atividade anterior.

O nono problema aborda o potencial de ionização dos metais. O Grupo A resolveu o problema e novamente alcançou nota máxima.

Por motivos como a mudança de horário, conselhos de classe, feriado e paralisação do magistério, passaram-se três semanas entre a primeira aula sobre o conceito fotoelétrico e a aula de apresentação dos problemas abertos. Por esse motivo, foi decidido revisar os assuntos já trabalhados com a turma e solicitar a apresentação para a próxima semana. No dia da apresentação, todos os grupos estavam presentes e, com exceção de alguns alunos, a turma participou efetivamente dos debates.

Até esse momento, já foi possível constatar a melhora na resolução dos problemas. Dois grupos lograram conceito máximo na atividade, dois grupos conseguiram evoluir na compreensão dos conceitos e na pesquisa, e um grupo apenas entregou os problemas resolvidos. Mesmo orientados a apresentar o trabalho e incentivados pelos colegas, o grupo manteve a decisão.

Embora a proposta tenha também o objetivo de desconstruir o “medo de errar” dos alunos através dos debates e conversas em aula, demonstrando que não existem respostas prontas e acabadas, e sim, respostas a serem construídas e melhoradas, alguns alunos ainda não apresentam seus trabalhos por vergonha e receio de errar.



Fonte: elaborado pela autora.

7º Planejamento:

A aula foi iniciada com a entrega do texto de apoio e uma breve revisão dialogada dos modelos atômicos de Thomson e Rutherford, assuntos abordados no primeiro ano do Ensino Médio na disciplina de química. Então o principal objetivo era estabelecer uma evolução histórica dos modelos atômicos, e os dois modelos atômicos são compreendidos pelos alunos. Na sequência, tratou-se do modelo de Bohr, com ênfase a sua ideia de propor o primeiro modelo atômico quantizado. Nesse momento, estabeleceu-se um diálogo enriquecedor com várias perguntas, que possibilitou retomar os assuntos já trabalhados, reorganizando e aprofundando concepções. O texto de apoio encontra-se no (apêndice E)

Ao término da revisão e dos debates, os grupos foram reorganizados devido à inclusão de quatro novos alunos na turma e o desentendimento entre os componentes de um grupo. Com o objetivo de melhor avaliar o desenvolvimento dos grupos, manteve-se a organização inicial com os ajustes necessários. Então os grupos receberam outro problema e foram encaminhados para o laboratório de informática.

Nesse dia, percebeu-se maior autonomia dos alunos na resolução dos problemas, apenas um grupo solicitou ajuda na compreensão da atividade. A nova atitude está em consonância com as expectativas da metodologia no decorrer do processo de resolução de questões abertas, ou seja, os alunos apropriando-se da proposta e desenvolvendo as habilidades de elaborar argumentos, formular hipóteses, trabalhar em grupo. Além disso, quando a resolução é apresentada e debatida com a turma, os alunos compreendem que não existe uma única resposta para a questão, mas respostas possíveis. Isso permite e incentiva a liberdade de expressão e de pensamento.

8° Planejamento:

Essa aula foi destinada à apresentação dos problemas abertos do espectro de absorção e de emissão relacionando o modelo atômico de Bohr. Para alcançar o conceito "A", cada grupo deveria desenvolver a habilidade de pesquisar e analisar as seguintes ideias:

No primeiro problema, a ideia central são os estados estacionários do átomo. O grupo D resolveu a questão, porém, obteve dificuldade de interpretar o problema, analisar a solução e por esse motivo sua apresentação ficou confusa. Após a apresentação, com o auxílio da professora, a questão foi retomada, debatida e compreendida pelo próprio grupo e demais colegas.

A segunda questão trata das implicações do estudo do corpo negro. O grupo A conseguiu interpretar o problema e explicar com suas palavras o conceito de corpo negro, mas demonstrou dificuldade de relacionar o conceito com sua aplicação no cotidiano.

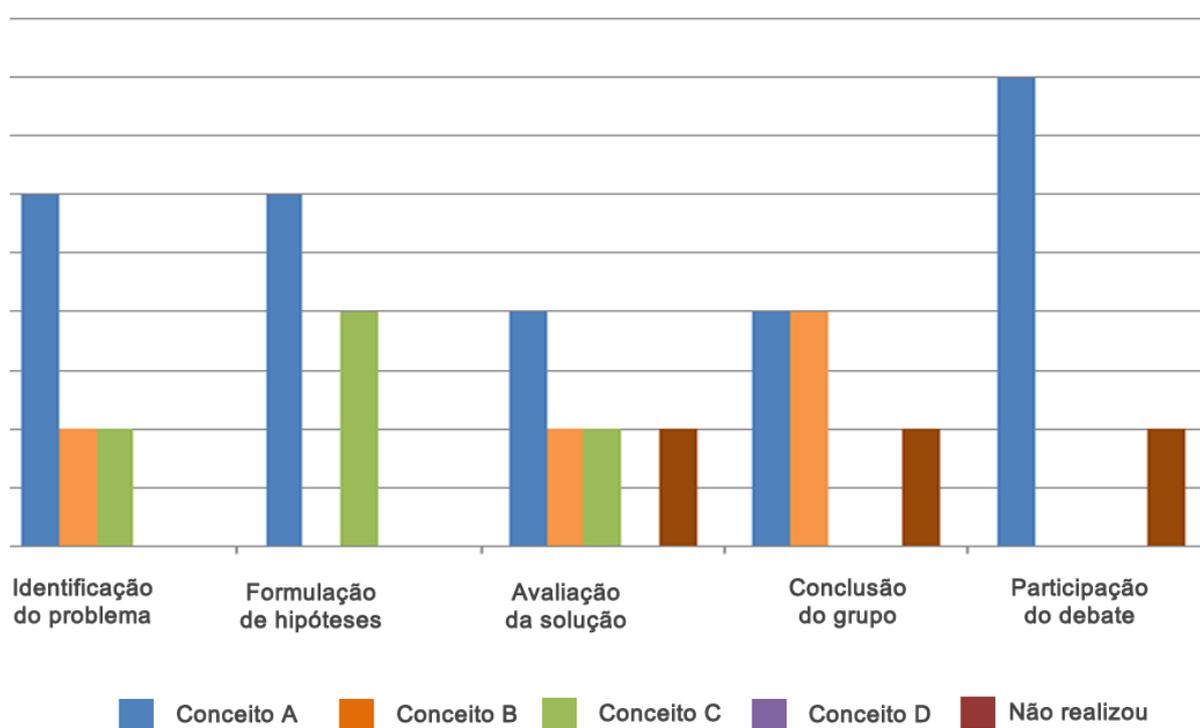
A terceira questão também aborda a relação conteúdo *versus* aplicabilidade. O grupo B organizou uma excelente pesquisa sobre os diversos tipos de lâmpadas encontradas no comércio, suas vantagens e desvantagens, e conseguiu estabelecer relações corretas dos conceitos envolvidos no funcionamento de uma lâmpada de LED. A pesquisa e a apresentação foram tão elucidativas que o debate foi quase desnecessário.

O quarto problema trabalhado tem o objetivo de estimular e debater o conceito de emissão da radiação e sua interação com a matéria. O grupo C conseguiu atingir

todos os requisitos necessários para a resolução dessa questão, e algumas colocações durante a apresentação do grupo renderam um debate oportuno para revisar e retomar conceitos.

A quinta questão também aborda o conceito de emissão da radiação e sua interação com a matéria. Ademais, permite aprofundar tais conceitos e a percepção de sua aplicabilidade no cotidiano. O grupo E ficou responsável pela resolução e apresentação da questão. Na semana anterior, o grupo trabalhou na resolução da questão, porém, no dia da apresentação, os integrantes do grupo faltaram à aula. Assim, a professora leu o problema e debateu sua solução com a turma.

Gráfico 4 - Desempenho dos alunos na terceira etapa de resolução



Fonte: elaborado pela autora.

9° e 10° Planejamentos:

Nesta última etapa de aula expositiva, foi revisado o comportamento físico de onda e de partícula na perspectiva da física clássica. Em continuidade, tratou-se da contribuição de De Broglie a respeito da dualidade onda-partícula, originalmente só atribuída ao fóton, para todas as partículas materiais. No decorrer das explicações, houve a comparação entre as abordagens da clássica e da física quântica para ondas

e partículas. Na sequência, o raciocínio foi completado com a interpretação da função de onda de Schrödinger, que permite uma nova compreensão do átomo, e a abordagem foi concluída, tratando do princípio da incerteza de Heisenberg. O texto de apoio utilizado nessa aula encontra-se no (apêndice F). Aos grupos foram entregues os últimos problemas e encaminhados para o laboratório de informática. Novamente aqueles com dificuldades na resolução anterior receberam dois problemas. Nessa fase da atividade, trabalharam com problemas mais complexos.

Na semana seguinte, os problemas foram apresentados e debatidos. Para a obtenção do conceito “A”, era necessária a interpretação dos seguintes aspectos:

No primeiro problema, o foco principal é a comprovação da dualidade onda-partícula da luz. O grupo E realizou uma pesquisa histórica sobre a compreensão da luz desde os antigos filósofos até a atualidade, o que oportunizou excelente debate. Contudo, o grupo não conseguiu estabelecer as relações necessárias para explicar o comportamento dual da luz.

O segundo problema reinterpreta a dicotomia conceitual “contínuo *versus* descontínuo”. Inicialmente, o grupo D apresentou dificuldade de interpretação do problema, mas conseguiu superá-la e não apenas resolveu o problema como abordou na apresentação questões relacionadas à resolução de imagens.

O terceiro problema aborda a interação radiação-matéria. O grupo A iniciou sua apresentação com uma explicação sobre a função da estufa e realizou a interpretação e solução correta do problema.

A quarta questão retoma a interação radiação-matéria através da abordagem das trajetórias irregulares dos feixes de luz oportunizar nova percepção para o mesmo assunto. O grupo A resolveu corretamente o problema, porém apresentou dificuldade em elaborar hipóteses, avaliar a solução e interpretá-la.

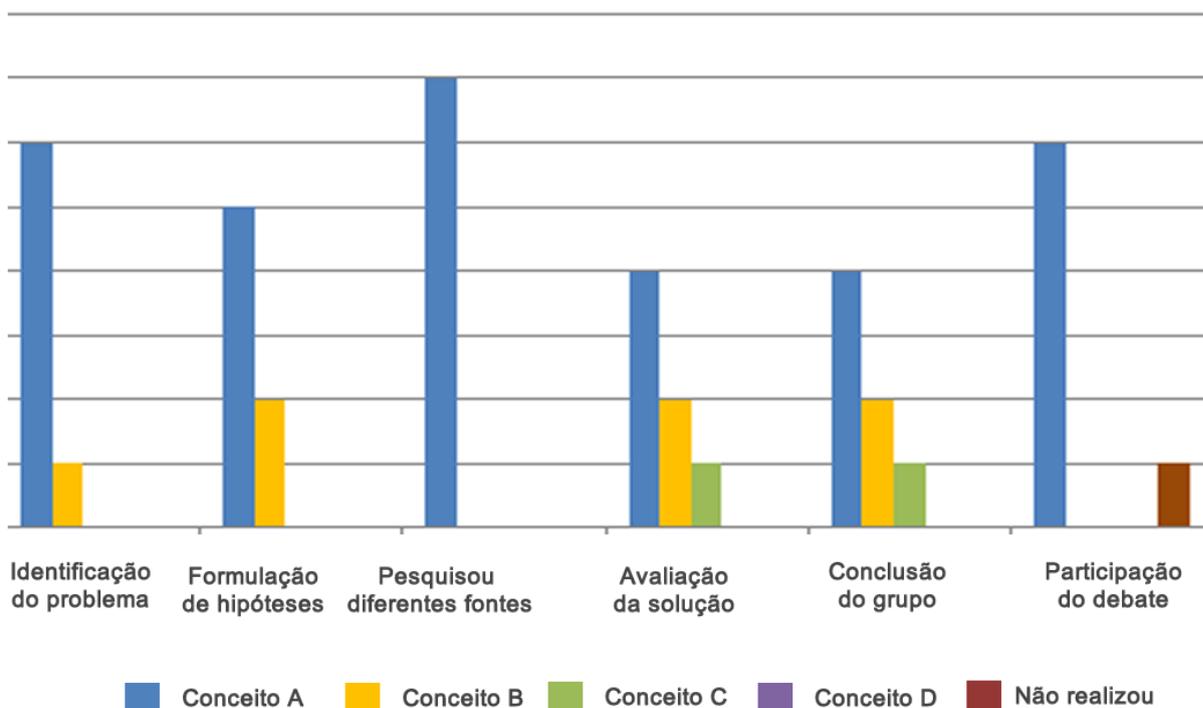
A quinta questão propicia estabelecer um paralelo entre as abordagens da física clássica e moderna para a característica de condução dos materiais. O grupo C obteve uma solução incompleta para o problema porque explicou a questão com a abordagem da física clássica.

O sexto problema relaciona o conceito com sua aplicabilidade no cotidiano. O grupo B resolveu a questão corretamente e organizou uma explicação histórica do desenvolvimento e aplicabilidade dos polímeros.

O sétimo problema aborda a interação radiação-matéria com diferentes tipos de materiais. O grupo D obteve êxito na sua resolução, abordando os diferentes

tecidos utilizados para a fabricação de guarda-sol. A professora complementou a apresentação explicando que a espessura e a tonalidade do material também são fatores que devem ser considerados na compra do guarda-sol.

Gráfico 5 - Desempenho dos alunos na quarta etapa de resolução



Fonte: elaborado pela autora.

11° Planejamento:

No intuito de investigar e melhor analisar a contribuição da metodologia para a aprendizagem significativa, o questionário investigativo foi novamente utilizado. Nesse sentido, para a análise comparativa, algumas questões foram abordadas novamente e, para surpreender e desafiar os alunos, novas questões foram adicionadas. Para tanto, nenhum material bibliográfico deveria ser consultado, e as respostas deveriam ser individuais. No dia planejado, 17 alunos estavam presentes e responderam ao questionário.

A seguir, a análise dos resultados obtidos nos questionários investigativos:

1°) A resolução da primeira questão demonstra um avanço significativo na compreensão do objeto de estudo da física clássica e moderna incluindo

exemplificações corretas. No primeiro questionário, muitos alunos não conseguiram explicar ou confundiram o conceito;

2º) No primeiro questionário, vários alunos não responderam essa questão. No segundo momento, alguns alunos responderam através da catástrofe do ultravioleta, outros abordaram a contribuição de Planck e o conceito de *quantum* e houve os que conseguiram formular a explicação estabelecendo relações entre os dois eventos. Portanto, é perceptível a evolução conceitual;

3º) Percebe-se também na terceira questão a evolução conceitual, no primeiro questionário já havia a compreensão da palavra *quantum* com certa quantidade, mas não conseguiam definir a que se referia. No segundo questionário, a expressão “quantidade mínima de energia” consta em todas as respostas;

4º) A quarta questão é abordada apenas no segundo questionário, e as respostas abordam tecnologia e o desenvolvimento de aparelhos na medicina;

5º) A quinta pergunta é mencionada apenas no segundo questionário, e muitos alunos conseguiram explicar o conceito e relacioná-lo com a luz;

6º) Nessa questão todas as respostas foram incompletas. Alguns apenas abordavam a incerteza da posição e a quantidade de movimento, outros abordaram apenas incerteza da energia e do intervalo de tempo. Também houve confusão sobre os pares conjugados, e alguns citaram o princípio da incerteza sem explicá-lo. Sendo assim, o princípio da incerteza de Heisenberg foi retomado na aula seguinte;

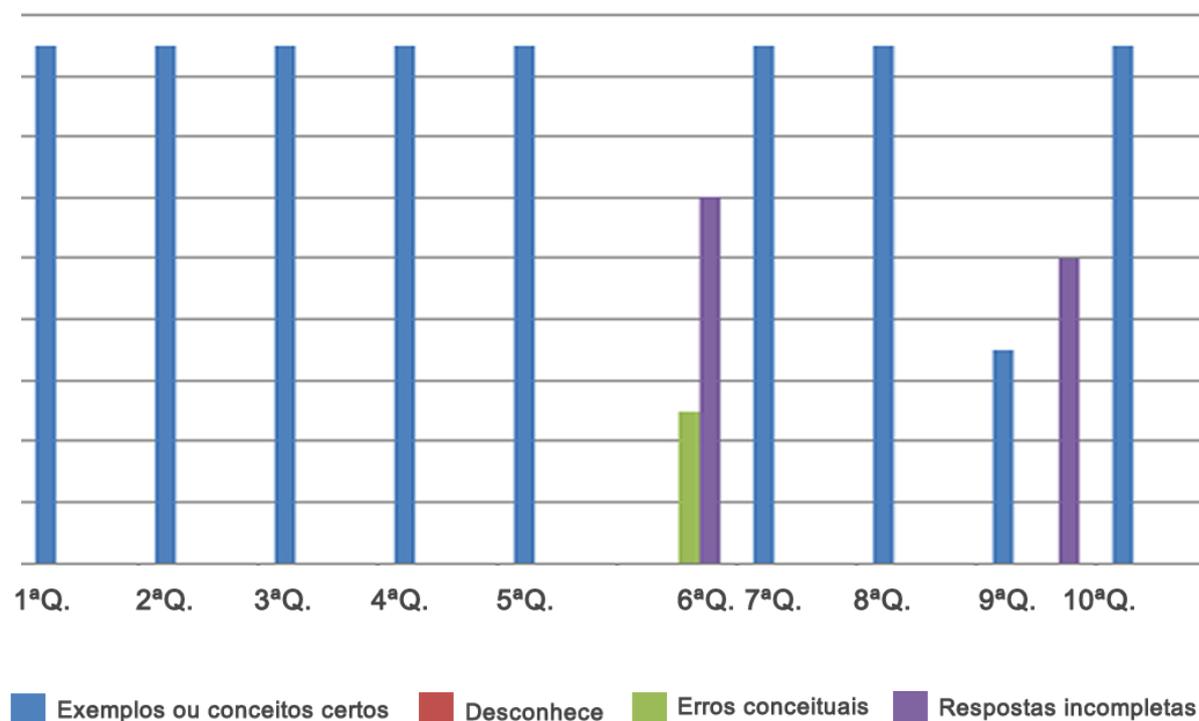
7º) Na sétima questão, também constatou-se uma melhora dos conceitos. Nessa questão, muitos alunos explicaram o efeito fotoelétrico e relacionaram as portas automáticas;

8º) Essa questão foi abordada no primeiro questionário e gerou muita curiosidade e interesse. Porém, naquele momento, muitos desconheciam a explicação ou demonstraram erros conceituais. Nesse segundo momento, foi perceptível a aprendizagem do conceito. Os alunos exemplificaram e abordaram os conceitos de análise espectral, espectro de emissão e absorção em suas respostas;

9º) Nessa questão, os alunos também demonstraram dificuldades em explicar duas incoerências. As respostas estavam certas, porém incompletas. Esse assunto também foi revisto na aula seguinte;

10º) A última pergunta teve o maior índice de erro conceitual no primeiro questionário. Novamente, em suas respostas, os alunos reafirmam a compreensão da análise espectral, demonstrando progresso conceitual.

Gráfico 6 - Desempenho dos alunos no 2º questionário investigativo



Fonte: elaborado pela autora.

No final da aula, após recolher o questionário investigativo, cada grupo deveria elaborar e solucionar um problema e apresentar os resultados no próximo encontro.

12º Planejamento:

O primeiro momento da aula foi destinado à apresentação dos problemas elaborados por cada grupo. A seguir, a transcrição dos problemas e suas resoluções, bem como a análise de cada problema.

Grupo C

Problema: A termografia é uma técnica de obtenção de imagens na qual se detectam ondas infravermelhas emitidas por corpos e objetos. Para facilitar a visualização, utilizam-se “cores falsas”, que representam as diferentes emissões do infravermelho, correspondente a diferentes temperaturas. Diariamente, ficamos

expostos a vários tipos de radiação e constantemente nosso organismo é bombardeado por elas. Qual a radiação de maior penetração no organismo humano? E como funciona a utilização das “cores falsas” na termografia?

Resposta: A radiação de maior penetração são os raios gamas, pois apresentam comprimentos de onda muito baixos, o que aumenta o seu poder de penetração.

As imagens são compostas por cores que representam um código e equivalem a determinadas temperaturas, em geral, quanto maior for a temperatura da região lida, mais vermelha será a cor. Assim, a intensidade da radiação infravermelha emitida por um corpo depende de sua temperatura, pois essas ondas são geradas pela agitação térmica das partículas que compõem o corpo, por esse motivo, as ondas de infravermelho são chamadas de ondas de calor.

Comentário: O grupo conseguiu formular o problema e elaborar um novo conhecimento: a termografia. A questão permite explorar o conceito sobre radiação ionizante e não ionizante, revisar a relação entre energia, comprimento de onda e frequência e aprofundar a compreensão sobre a radiação infravermelha e sua aplicabilidade. Na resolução, o grupo não explorou todo o potencial do problema, e a professora fez algumas intervenções durante a apresentação para melhor explorar a questão e fomentar o debate.

Grupo D:

Problema: Em 1889, Heinrich Rudolf Hertz conseguiu produzir e detectar as ondas eletromagnéticas de rádio em laboratório, confirmando a precisão teórica de Maxwell, ondas eletromagnéticas podem se propagar no meio material? E quais são as faixas do espectro eletromagnético?

Resposta: As ondas eletromagnéticas se propagam no meio material e no vácuo, o espectro das ondas eletromagnéticas é contínuo. Maxwell concluiu que a luz visível também é uma onda eletromagnética. As principais faixas do espectro eletromagnético são: ondas longas, ondas de telecomunicação como: de rádio AM e FM, TV, ondas de celulares, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta raios-X, raios gamas. Todas as ondas eletromagnéticas transportam energia, e essa energia é tanto maior quanto menor for seu comprimento de onda.

Comentário: Percebe-se que o grupo teve dificuldades em elaborar o problema aberto. A questão implica uma resposta direta, o enunciado não aborda informações novas tão necessárias para gerar a investigação em sua resolução. Nesse sentido, a questão foi explorada para rever os conceitos trabalhados sobre ondas eletromagnéticas.

Grupo A:

Problema: Um aluno do 3º ano, curioso, fez a seguinte pergunta ao seu professor de física: Por que alguns os ponteiros do meu relógio brilham no escuro e emitem a luz verde?

Resposta: A razão para os relógios e outros objetos emitirem luz no escuro é fosforescência que absorve energia (nesse caso a luz) e lentamente reemite essa energia. A cor verde é característica da substância sulfeto de zinco, que, ao brilhar, exibe naturalmente a cor verde.

Comentário: O grupo abordou uma nova informação na elaboração da questão, de maneira sucinta e correta, conseguiu realizar o desafio proposto. Além disso, o problema permite rever os conceitos de fosforescência e de fluorescência e suas aplicabilidades.

Grupo B:

Problema: A espectrografia consiste na análise da luz emitida por um elemento ou substância química. Por que as linhas espectrais são coloridas ou escuras? E o que significa a distância entre essas linhas?

Resposta: As linhas espectrais ou raias correspondem à frequência dos fótons emitidos ou absorvidos, isto é, quando os elétrons saem de níveis de maior energia para níveis de menor energia emitem fótons, e as raias são coloridas (espectro de emissão). Quando os elétrons absorvem fótons, ou seja, saem de níveis de menor energia para níveis de maior energia, as raias são escuras. Para um mesmo elemento químico, a posição das linhas de emissão ou absorção no espectro é a mesma, cada elemento químico possui um conjunto de linhas espectrais que o caracterizam.

Comentário: Embora a teor da questão abordada seja de fundamental importância para a compreensão dos conceitos quânticos, o grupo não consegue trazer novos elementos para elaborar seu problema. Assim, a atividade é parcialmente realizada pelo grupo.

O grupo E demonstrou muitas dificuldades em formular o problema e não conseguiu realizar a atividade.

No segundo momento da aula, os estudantes receberam os dois questionários investigativos corrigidos. Como esperado, os educandos, ao comparar suas respostas nos dois questionários, constataram sua evolução conceitual, o que lhes proporcionou grande alegria e entusiasmo. Após a celebração dos resultados obtidos, a sexta e a nona questões foram retomadas para sanar algumas dúvidas sobre o princípio da incerteza de Heisenberg e as incoerências do modelo atômico de Bohr. Após elucidar as questões, foi realizado um debate sobre a sua percepção da metodologia da atividade. A principal pergunta foi: O método contribuiu para melhorar a compreensão dos conceitos físicos? As respostas obtidas foram emocionantes e tornou-se evidente que o método foi impactante positivamente para o aprendizado dos estudantes da turma, em razão do comprometimento demonstrado ao longo do processo. Ademais, durante a metodologia, os grupos estavam competindo entre si pela melhor apresentação e solução do problema. Essa postura de competição saudável demonstrou o quanto a metodologia foi instigante e desafiante para os alunos.

6 ANÁLISE GERAL

Para melhor compreensão do desenvolvimento de cada grupo durante o processo, será descrito e analisado o desempenho geral dos grupos.

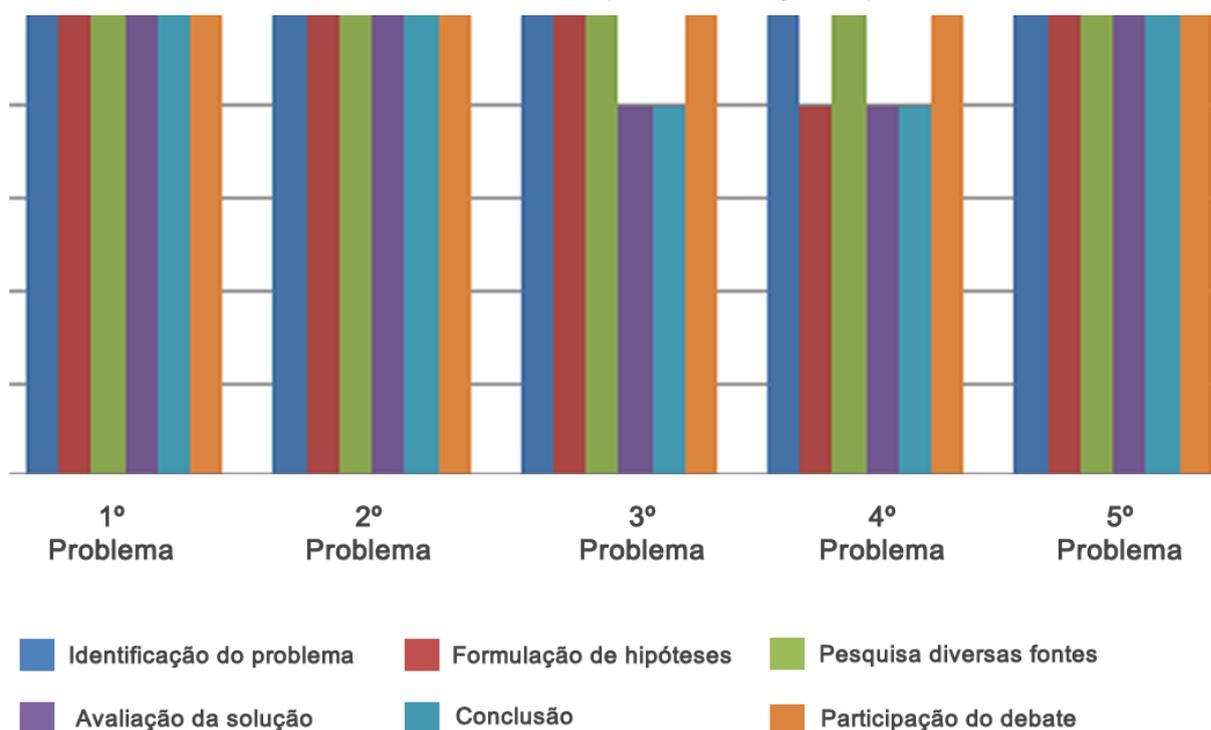
Para ajudar na visualização desse processo, foram construídos gráficos, nos quais foram utilizados os seguintes valores: Conceito A – valor 10, conceito B – valor 8, conceito C – valor 6, conceito D – valor 5 e não realizou – valor 0.

6.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GRUPO A

O grupo manteve os mesmos quatro componentes até o final da proposta metodológica e obteve ótimo rendimento na resolução dos primeiros problemas, mas, na sequência, apresentou dificuldades nas interpretações dos resultados encontrados em dois problemas, conseguindo superá-las no último problema. Também demonstrou a habilidade de formular problemas, abordar e relacionar novas informações com conceitos já trabalhados.

As dificuldades demonstradas pelo grupo de interpretar as soluções corretas dos problemas apontam para a adversidade de domínio de um Campo Conceitual, pois o grupo consegue solucionar a questão, porém não interpretá-la.

Gráfico 7 - Rendimento do Grupo A na resolução de problemas



Fonte: elaborado pela autora.

6.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO GRUPO B

Esse grupo era composto de quatro componentes e, na segunda semana, um deles foi transferido de escola, permanecendo com três componentes durante quatro semanas, até que um novo foi inserido ao grupo.

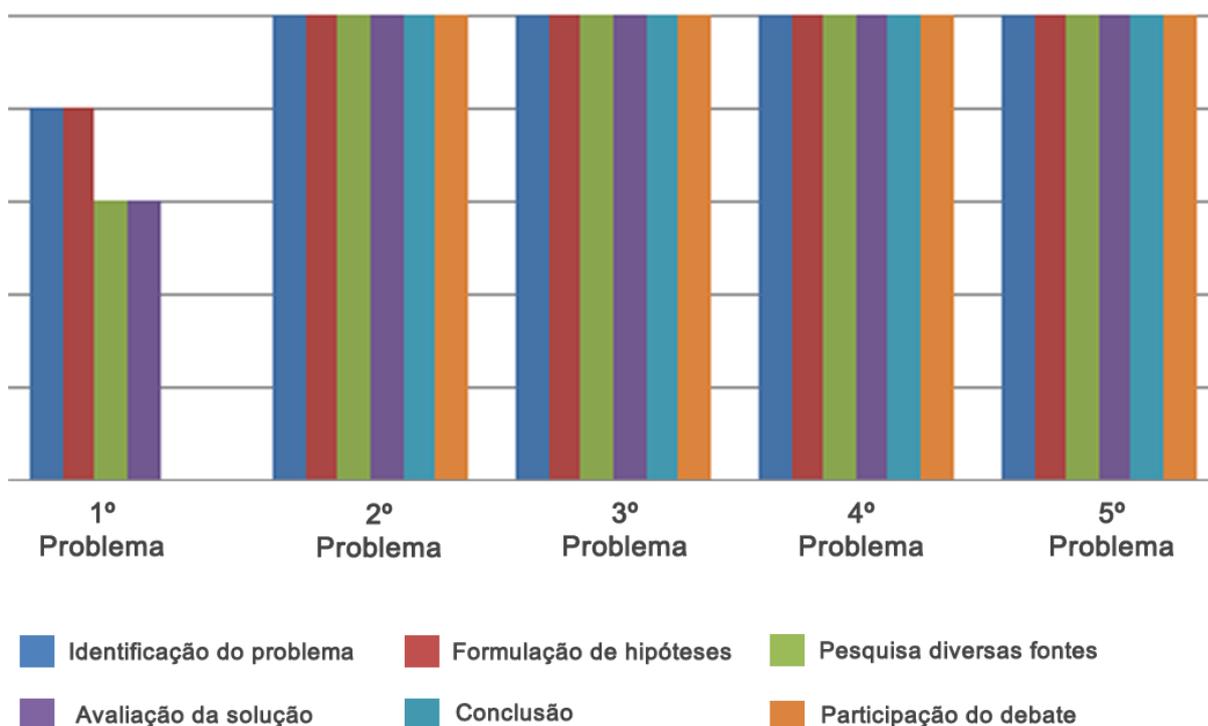
Inicialmente, no primeiro problema, o grupo apresentou dificuldades de comunicação e execução do trabalho, pois organizou a atividade unicamente através da divisão de tarefas. Essa é uma atitude comum entre os alunos: dividir partes do trabalho sem compreender a sua totalidade. Tal postura explica o baixo rendimento na resolução do primeiro problema.

Trabalhar em grupo é saber dividir tarefas, mas também organizá-las e analisá-las em conjunto. Uma vez compreendido o objetivo e a forma de organizar o trabalho, o grupo alcançou o conceito máximo nas demais atividades e também demonstrou habilidade em formular problemas, mesmo não abordando novos elementos em seu enunciado.

Esse resultado é o ápice desejado nesta metodologia. Ao resolver um problema aberto, o grupo supera obstáculos e aperfeiçoa suas habilidades. Em

concordância com Vergnaud (2017, p.102), quando um problema é revolido, seu caráter problemático desaparece, e a competência habilita o estudante a reconhecer e formular novos problemas. Trata-se de um processo cíclico.

Gráfico 8 - Rendimento do Grupo B na resolução de problemas



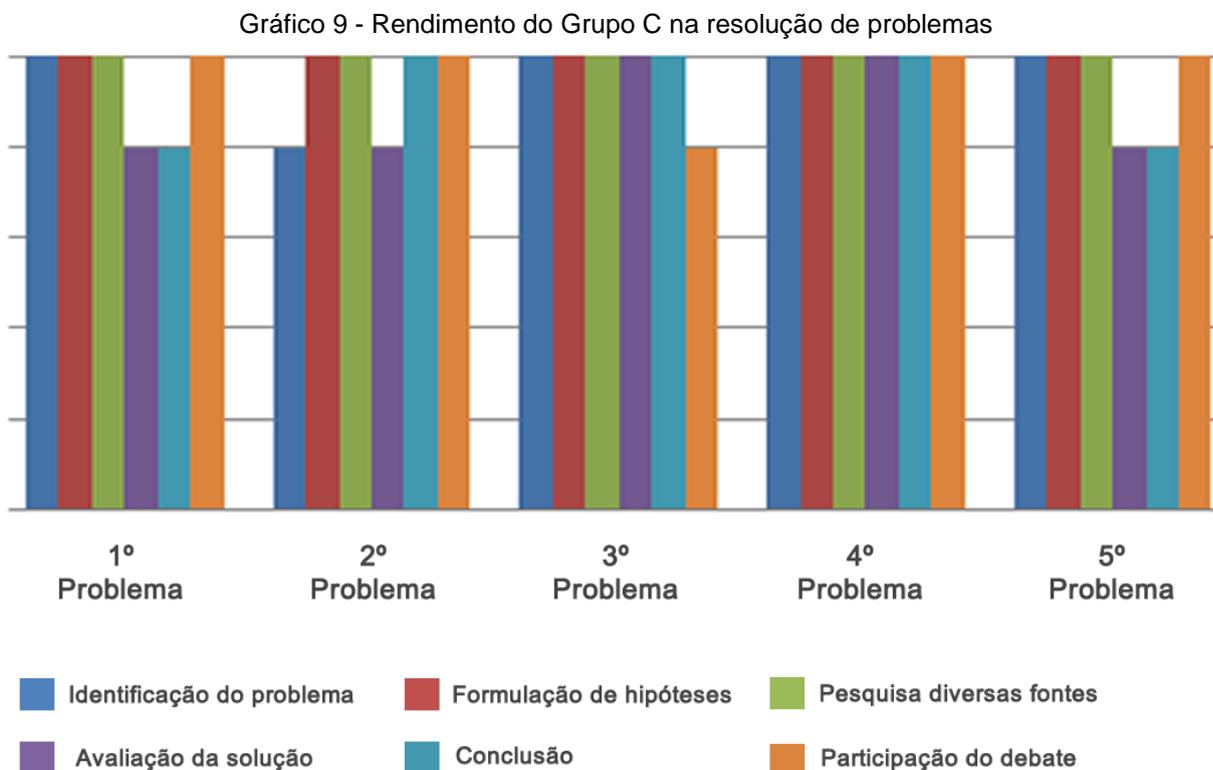
Fonte: elaborado pela autora.

6.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GRUPO C

Esse grupo iniciou a prática com três componentes e, posteriormente, agregou um quarto ao grupo.

No primeiro momento, o grupo apresentou dificuldade de interpretar e concluir a solução do problema. Já no segundo, demonstrou dificuldade de identificar o problema e avaliar sua solução. No terceiro e no quarto problemas, o grupo superou tais limitações, porém, na última questão, novamente apresentou dúvidas na interpretação da resolução. O desempenho do grupo proporciona a observação e reflexão que o processo de aprendizagem não é uma linearidade crescente, ao contrário é constituído de avanços, pausas e retorno para a reorganização e reformulação de conceitos e ideias. Na concepção de Vergnaud (2017, p.99), a

trajetória do aprendiz na organização de um Campo Conceitual científico é sinuosa, difícil e demorada.



Fonte: elaborado pela autora.

6.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GRUPO D

Na formação inicial, o grupo era composto por três componentes. No decorrer do trabalho, algumas divergências entre eles ocasionaram a transferência de um componente para outro grupo, e duas novas alunas ajudaram a recompor o grupo.

Observa-se que este grupo obteve maiores dificuldades e com o objetivo de superá-las ao longo do processo, o grupo resolveu na totalidade seis problemas. Em parte, essas dificuldades estão correlacionadas à própria composição do grupo, pois era perceptível que apenas dois componentes estavam desenvolvendo o trabalho. Nessas primeiras avaliações, permaneceu a dúvida: Será um problema de interação entre os componentes ou falta de comprometimento de um deles?

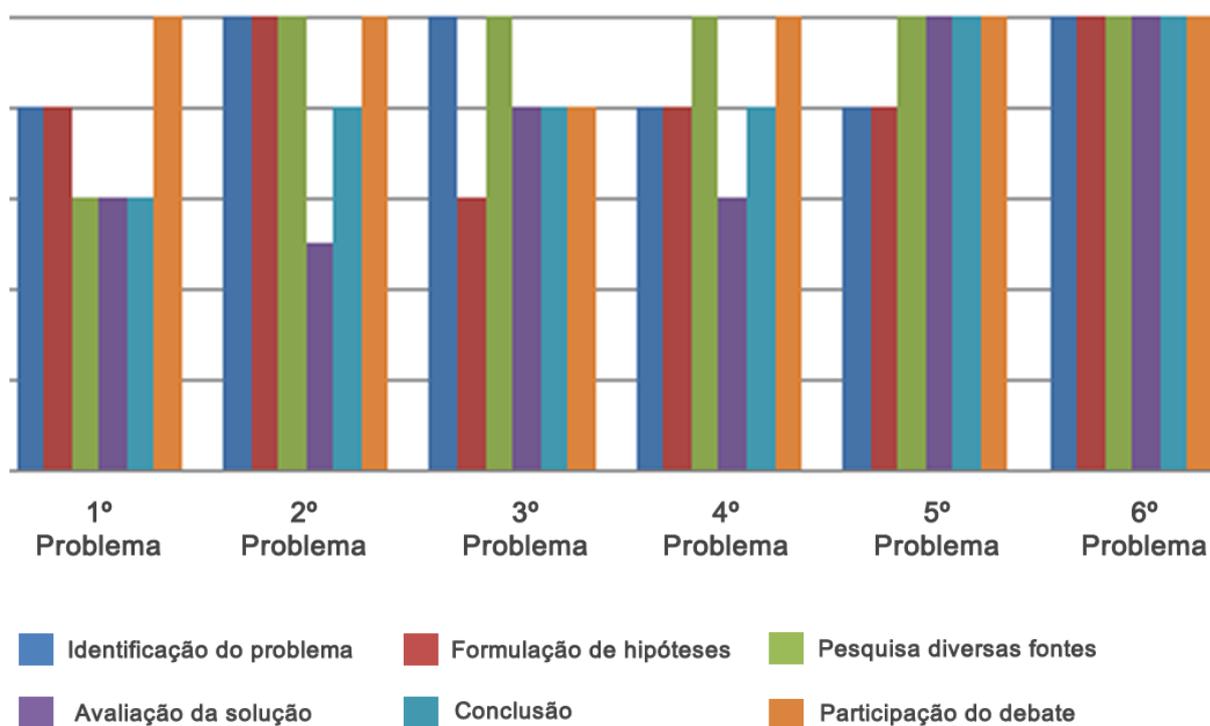
Após a reorganização efetuada na terceira etapa da metodologia, ou seja, no quarto problema, foi perceptível a evolução do grupo. No quarto problema, o grupo

ainda demonstrou dificuldades, que foram progressivamente superadas no quinto e no sexto problemas.

Em tempo, é necessário refletir sobre a importância do trabalho em grupo na metodologia de resolução de problemas abertos. Todas as etapas contribuem para fortalecer a habilidade de trabalhar em grupo, pois é necessário compartilhar, analisar diversas informações e debatê-las para melhor construir a resolução do problema. Entretanto, quando o trabalho não é realizado pelo grupo, sobrecarregando um ou dois componentes, não haverá a riqueza da metodológica desejada, e os resultados alcançados são medíocres.

Também não devemos desconsiderar as próprias limitações dos componentes na habilidade de identificar o problema e analisar a solução encontrada. Contudo, o grupo, ou melhor, “a dupla” comprometida e persistente, conseguiu superar as limitações, e a inclusão de novos componentes colaborou para o êxito no trabalho. No quesito de formular novas questões, o grupo demonstrou a necessidade de tempo para desenvolver e melhorar suas habilidades.

Gráfico 10 - Rendimento do Grupo D na resolução de problemas



Fonte: elaborado pela autora.

6.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GRUPO E

O grupo manteve sua formação inicial com três componentes, mas, ao longo do processo, raramente eles estiveram presentes em aula. Como já mencionado anteriormente, essa atitude comprometeu a totalidade do trabalho.

Várias abordagens e tratativas foram realizadas pela professora no decorrer das aulas no intuito de incentivar, orientar, alertar. Entretanto, não surtiu o efeito desejado. Em conversas informais com colegas de trabalho e no conselho de classe do primeiro e do segundo trimestres, constataram-se as mesmas atitudes dos alunos, ou seja, infrequência e baixo desempenho.

O grupo modificou a postura no início do terceiro trimestre por ocasião da resolução do quinto problema. A repentina mudança pode ser decorrência do início do último trimestre, porque alguns alunos cultivam um pensamento de recuperar o trimestre.

Nesse contexto, é difícil avaliar o trabalho do grupo, visto que do primeiro ao quarto problemas a resolução ocorreu com partes do grupo. Assim, a atenção é direcionada para o quinto problema, no qual, verdadeiramente, ocorreu a resolução em grupo. Nesse problema, percebe-se que o grupo compreendeu o problema e buscou diversas fontes para construir a solução. Porém, as dificuldades em elaborar hipóteses, avaliar, interpretar e construir a solução do problema demonstram insegurança conceitual. As dificuldades em relacionar e compreender os conceitos foram determinantes para que o grupo não conseguisse realizar a última atividade, ou seja, formular e resolver um problema.

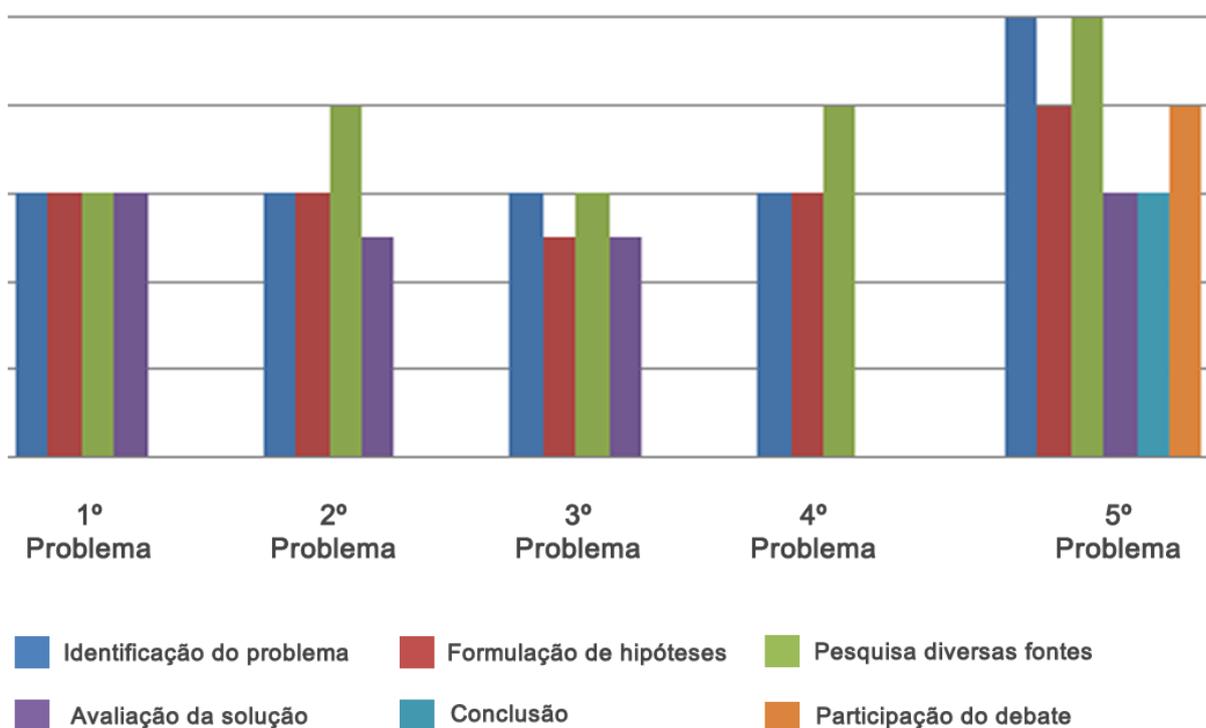
A proposta metodológica aqui desenvolvida tem, entre outros, os objetivos de cativar, aguçar, motivar o aluno a aprender e a ressignificar sua percepção da disciplina. Para tanto, a participação e o comprometimento com a proposta são fundamentais.

De acordo com Bachelard (2001, p.66), nada é dado; tudo é construído. Para Becker (2012, p. 56), o sujeito constitui-se a partir de suas ações sobre essas instâncias, e não como reflexo ou produto da pressão dessas instâncias sobre ele.

Assim, é na ação, no se permitir agir, e na superação das limitações que se constrói o conhecimento da mesma maneira que a metodologia adquire sentido. Portanto, é provável que as dificuldades encontradas pelo grupo sejam o resultado de sua inércia ao longo do processo.

Além disso, mesmo com contínuo esforço da docente, talvez mesmo uma boa proposta metodológica não consiga sensibilizar a todos.

Gráfico 11 - Rendimento do Grupo E na resolução de problemas



Fonte: elaborado pela autora.

Analisando o rendimento dos grupos que participaram de todas as atividades propostas, é perceptível a melhora em suas habilidades. No início, a pesquisa era superficial, caracterizada pelas informações encontradas em *sites* populares, não havendo o hábito de buscar aprofundamento na pesquisa ou procurar informações mais consistentes. Ao longo do trabalho, essa atitude se modificou.

A insegurança demonstrada na interpretação, resolução e apresentação dos primeiros problemas cedeu espaço para a autonomia no trabalho em grupo e desenvoltura na apresentação das resoluções.

Ademais, o progresso conceitual é notório e comprovado a partir das análises realizadas nos questionários investigativos, como também na elaboração de hipóteses e nas construções de respostas cada vez mais elaboradas.

A habilidade de elaborar problemas também foi identificada, ainda que necessite de tempo para ser aperfeiçoada.

Soma-se a isso a notável mudança de postura dos alunos com maior autonomia e independência na sala de aula.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho descrito é fruto da construção e implementação do Produto Educacional em uma turma de terceiro ano do Ensino Médio na rede pública de ensino do Estado do Rio Grande do Sul.

O Produto teve por objetivos melhorar as habilidades de resolução de problemas, trabalhar em grupo, estimular a autonomia na criação e resolução de novos problemas e aumentar o interesse dos alunos pela disciplina de Física.

Para tanto, foram trabalhados os conceitos de Física Quântica relacionando os fenômenos físicos e sua aplicabilidade no cotidiano, através da metodologia de resolução de problemas abertos. As situações-problemas foram elaboradas pela autora do trabalho, como também são resultados da revisão bibliográfica de livros didáticos do Ensino Médio.

No intuito de melhor avaliar o desenvolvimento das habilidades e a aprendizagem dos alunos, o processo avaliativo foi dividido em três partes. A primeira constituiu em aplicar dois questionários. O primeiro questionário, anterior ao desenvolvimento metodológico, tinha o objetivo de investigar os conhecimentos prévios, e o segundo, analisar a evolução conceitual.

A segunda parte foi organizada em quatro momentos de resolução dos problemas, de acordo com o desenvolvimento dos conceitos físicos. Durante esse processo, foi avaliada cada etapa da resolução, como também a oralidade na apresentação e a participação no debate das soluções apresentadas. Dessa maneira, valorizou-se todo o caminho percorrido pelo aluno, e não apenas o resultado final da questão.

A última etapa tinha o propósito de averiguar a habilidade de formular e resolver problemas.

Ao refletir sobre os resultados do Produto Educacional, destaco alguns aspectos:

Nos primeiros problemas, a constante necessidade dos alunos de indagar a professora sobre a interpretação e demais etapas da construção da solução demonstra a insegurança nessas habilidades e/ou o hábito de aprender dessa forma. A preocupação em encontrar a “resposta correta” confirma a prática avaliativa que prioriza a resposta final. Mas, no decorrer das atividades, as mudanças de atitudes nos grupos tornam-se visíveis, a autonomia de ler e interpretar o problema, organizar,

sistematizar a pesquisa e elaborar coletivamente a solução da questão. Assim, o trabalho em grupo também contribui para que, individualmente, cada aluno aperfeiçoasse suas habilidades e superasse dificuldades.

A proposta de avaliar todas as etapas do processo oportunizou o reconhecimento desejado pelos alunos, contribuindo para aumentar o comprometimento e a responsabilidade dos grupos e, dessa maneira, diminuir a infrequência nas aulas de física.

A metodologia também contribuiu para melhorar a oralidade e a postura nas apresentações de trabalhos. A organização das apresentações foi estabelecida através da leitura do problema, sua resolução e posterior explicação. Nesse momento, o aluno verbalizava sua explicação, utilizando-se dos conceitos físicos e, neste esforço, desenvolve sua oratória. Também propicia ao professor identificar e sanar as dúvidas ou conceitos mal compreendidos pelos alunos.

Ademais, a proposta de debater todas as soluções e reorganizar as respostas minimizou a resistência de muitos alunos à apresentação de trabalhos, pois, entre os vários fatores que contribuem para isso, a vergonha ou o medo de errar a resposta em público ganham destaque. Portanto, a insegurança é subtraída com o enfoque da metodologia.

A autonomia de formular e revolver problema também são evidenciadas. Entretanto, como qualquer habilidade requer tempo para ser desenvolvida e aperfeiçoada.

Em síntese, a proposta colabora no trabalho do docente porque auxilia a identificar as barreiras durante o processo de aprendizagem. Sabe-se que são inúmeras as limitações a serem superadas, tais como a compreensão errada do conceito, a dificuldade de interpretar e relacionar, de resolver e avaliar respostas, de comunicação. O principal ganho pedagógico é conseguir reconhecer em cada aluno sua limitação e auxiliá-lo a superá-la.

Portanto, o trabalho demonstra a possibilidade de mudar as atitudes dos alunos em aula. O docente passa a orientar o trabalho, colaborando no enriquecimento do processo. O aluno desenvolve atitudes de responsabilidade e coparticipação em sua aprendizagem. Assim, o estudante apura as habilidades de ser criterioso na busca de informações, avaliar e emitir opinião, interpretar e resolver problemas, ou seja, aprende a aprender adquirindo segurança e autonomia.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

BRASIL, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN+ Ensino Médio:** orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC, SEMETEC, 2002.

BECKER, Fernando. **Educação e construção do conhecimento.** 2.ed. Porto Alegre: Peso, 2012.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de (Org.). **Ensino de ciências:** unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

_____; GIL-PÉREZ, D. **Formação de professores de ciências:** tendências e inovações. São Paulo: Cortez, 2006.

DEMO, Pedro. **Educar pela pesquisa.** 9.ed. Campinas: Autores Associados, 2011.

_____. **Do saber fazer ao saber dizer:** uma análise do papel da resolução de problemas na aprendizagem conceitual de física. Pesquisa em Educação em Ciências, v. 5, n. 1, 2003.

GIL-PÉREZ, D. Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 11, n. 2, p.197-212, 1993.

_____; GONZÁLEZ, E. Las prácticas de laboratorio en física en la formación del profesorado (1) Un análisis crítico. **Revista de Enseñanza de la Física**, v.6, n.1, p. 47-61, 1993.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teorias de aprendizagem.** 2 ed. São Paulo: EPU, 2011.

PIETROCOLA, Mauricio. **Ensino de Física:** conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: UFSC, 2001.

POLYA, George. **A arte de resolver problemas:** um novo aspecto do método matemático. Rio de Janeiro: Interciência, 1995.

POZO, Juan Ignacio. **A aprendizagem e o ensino de ciências:** do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico. Porto Alegre: Artmed, 2009.

_____. **A Solução de Problemas:** Aprender a resolver, resolver para aprender. Porto Alegre: ArtMed, 1998.

POZO, Juan Ignacio. Resolução de problemas abertos no ensino de física: uma revisão da literatura. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 3, 2017.

SANTOS, Célia Regina B. **Modelo alternativo de didática da resolução de problemas de física**. Trabalho Final de Graduação, Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www.ucb.br/sites/100/118/TCC/1%C2%BA2008/TCC03Celia.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

VERGNAUD, Gérard. **O que é aprender? O iceberg da conceitualização**. Porto Alegre: GEEMPA, 2017.

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL



PRODUTO EDUCACIONAL

RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS ABERTOS:

Uma proposta para o ensino de Física Quântica

GIOVANA ESPÍNDOLA BATISTA

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal (Orientador)

Prof. Dr. Ederson Staudt (Coorientador)

Tramandaí
Março de 2019

APRESENTAÇÃO

Frente a tantos avanços tecnológicos, é necessário e desafiador pensar estratégias de ensino que contemplem sua compreensão. Ademais, os parâmetros curriculares nacional (PCNs) orientam para a necessidade de modernização no ensino de física, incentivando também a aludir tópicos de Física Moderna. Nesse contexto, o produto educacional tem o objetivo de uma abordagem contextualizada da Física Quântica que permita a compreensão da ciência enquanto construção humana, suas contribuições e implicações para o desenvolvimento tecnológico e social.

Para tanto, optou-se pela estratégia de resolução de problemas abertos, pois contribuir para que os alunos desenvolvam a capacidade argumentativa e a autonomia na busca de informações para a construção do seu conhecimento. Segundo Echeverría e Pozo (1998), o objetivo principal da aprendizagem através da resolução de problemas abertos é desenvolver no aluno o hábito de enfrentar a aprendizagem como um desafio, para o qual se deve encontrar uma resposta. De acordo com os autores, a metodologia possibilita ao aluno estabelecer relações entre o conteúdo e o cotidiano, instiga sua curiosidade, fomenta a argumentação e o debate, desenvolvendo o pensamento crítico ao induzir a análise e a interpretação de dados e estimula a confiança na tomada de decisões para resolver o problema.

Problemas abertos são questões para as quais não existe uma solução preestabelecida e, por isso, permite a cada releitura uma nova condição de hipótese a ser estabelecida para a sua resolução, modificando e aprofundando a aprendizagem do aluno. As questões abertas possibilitam sempre uma reorganização em suas respostas, demonstrando ao estudante um processo de contínua evolução do conhecimento. Assim, o professor deve atuar como mediador na resolução dos problemas, estimulando o debate, o raciocínio crítico, a participação, o trabalho colaborativo, a releitura da questão, analisando e explorando diferentes aspectos.

A sequência didática está organizada em 27 aulas, divididas em 12 momentos, e inicia com uma contextualização histórica e científico final do século XIX e início do século XX, posteriormente trabalha com as ideias iniciais de física quântica e seu desenvolvimento no decorrer do tempo. Os conteúdos são trabalhados com o objetivo de viabilizar subsídios necessários para promover a autonomia necessária na resolução dos problemas abertos pelos alunos.

Assim, a organização da estratégia didática ocorrerá sempre através da exposição oral sobre determinado assunto, utilizando-se para isso os textos de apoio. Após a exposição, serão entregues os problemas abertos, e cada grupo receberá um ou dois problema(s) diferenciado(s). Neste segundo momento da aula, ocorrerá a investigação e resolução dos problemas. É importante prever a realização de certo intervalo de tempo entre a pesquisa e a apresentação da solução do problema para a melhor organização e estudo da resolução por parte dos grupos. Nessa perspectiva, ocorrerá uma semana de intervalo entre a resolução e a apresentação. Na aula destinada à apresentação dos problemas, cada grupo deverá ler o problema e comentar sua resolução. Após as apresentações, as soluções dos problemas serão debatidas no grande grupo, objetivando explorar as respostas dos problemas e retomar os conceitos trabalhados na aula expositiva, estabelecendo relações entre o conceito e suas aplicabilidades.

Nesse sentido, considero que a metodologia se enquadra em uma perspectiva motivacional que estimula a criatividade e a autonomia, pois cada aluno utilizará seus conhecimentos, experiências e interpretações para resolver diferentes situações-problemas.

Orientações pedagógicas para a resolução de problemas abertos

Através da resolução de questões abertas, espera-se desenvolver uma aprendizagem efetiva.

Nesse contexto, os problemas são implementados com progressivo grau de dificuldade: os primeiros problemas têm o objetivo de instruir e familiarizar a metodologia ao aluno e, na medida em que o estudante vai adquirindo subsídios mais elaborados, a complexidade dos problemas aumenta.

O trabalho em grupo também é fundamental para o desenvolvimento dessa proposta, pois possibilita a troca de informações, a argumentação e o esclarecimento de dúvidas. Também oportuniza que no decorrer do processo os problemas sejam organizados e distribuídos conforme as dificuldades e necessidades de cada grupo, postura que é possível devido ao olhar atento do professor.

Ao trabalhar essa metodologia, algumas etapas no processo de resolução dos problemas devem ser desenvolvidas para garantir a compreensão e a participação

efetiva do aluno. O papel do professor é encorajar o aluno a encontrar a melhor solução para o problema e ao longo do processo fomentar a ressignificação e incorporação de novos conhecimentos fundamentais para uma aprendizagem significativa. Assim, as etapas são baseadas nas ideias nos autores G. Polya (1995) e Pozo (1998). O quadro abaixo tem o objetivo de esclarecer tais etapas. A organização numérica é uma sequência que visa à organização das principais etapas na resolução, porém não é estática e deve ser retomada, se necessário, durante o processo:

Quadro 2 - Etapas da metodologia de problemas abertos

Etapas	Papel do aluno	Papel do professor
1ª Etapa	Compreender o problema: Ler e reler o problema, percebendo claramente o que é necessário para reunir informações sobre o problema; O que se quer? O que é desconhecido?	Habituar o aluno a tomar suas próprias decisões e refletir sobre elas, dando-lhe autonomia.
2ª Etapa	Delinear um plano: Selecionar as informações pertinentes e delinear como serão utilizadas. Quais informações são importantes? Como será resolvido?	Fomentar a cooperação entre os alunos, incentivar o debate sobre os diversos pontos de vista e analisar as diferentes hipóteses.
3ª Etapa	Executar o plano traçado para a resolução;	Realizar um trabalho de apoio dirigido para fazer perguntas ao invés de dar as respostas às perguntas dos alunos.
4ª Etapa	Olhar retrospectivamente: o solucionador deve avaliar a solução obtida. Nenhuma informação foi deixada de lado? É possível encontrar outra resposta? É possível verificar o resultado? A retrospectiva é fundamental para análise e entendimento do problema.	Fomentar a cooperação entre os alunos, incentivar o debate sobre os diversos pontos de vista e analisar as soluções diferentes.
5ª Etapa	Leitura e apresentação da resolução do problema pelo grupo para a turma.	Fomentar a leitura dos problemas e suas respostas. É possível encontrar outra resposta ou melhorar a mesma? Viabilizar o debate das respectivas respostas com o grande grupo.

Fonte: elaborado pela autora.

As etapas de resolução dos problemas também devem nortear o processo avaliativo, porque permitem analisar e valorizar todo o processo de construção da resposta do aluno, ademais, possibilita diagnosticar as dificuldades do aluno, permitindo ao professor desenvolver estratégias para atenuá-las ou saná-las. Dessa maneira, além de servir ao aluno como referência para seu aprendizado, a avaliação é uma análise que norteia o trabalho do professor.

Assim, de acordo com Gil Pérez (1992), a avaliação de problemas deve englobar determinados critérios: interpretação e compreensão do problema, a capacidade de formular hipótese, a postura investigativa, o desenvolvimento da aquisição de conceitos, o desempenho oral, a atitude colaborativa em grupo. A partir desses critérios, as práticas avaliativas estarão alicerçadas em analisar a trajetória do aluno.

Quadro 3 - Planejamento do Produto Educacional

Plano Períodos	Conteúdos	Objetivos	Estratégia Metodológica
1º Plano 1 período	Radiação eletromagnética Efeito fotoelétrico	Investigar os conhecimentos prévios dos alunos	Questionário investigativo
2º Plano 2 períodos	Contexto histórico do final do século XIX e início do século XX	Através de um texto, promover um debate sobre os aspectos históricos que contribuíram para o desenvolvimento da Física Quântica.	Artigo: O início de uma moderna revolução.
3º Plano 2 períodos	Radiação eletromagnética Corpo negro; Lei de radiação de Planck	Conceituar o espectro eletromagnético; Aprofundar o conceito de corpo negro e radiação térmica já discutida na termodinâmica.	Aulas expositivas utilizando o recurso de <i>slides</i> e texto de apoio: Radiação de um corpo negro. Entrega dos primeiros problemas abertos.
4º Plano 2 períodos	Radiação eletromagnética Corpo negro; Lei de radiação de Planck	Aprofundar e retomar os conceitos de espectro eletromagnético e radiação de um corpo negro; Avaliar o entendimento dos conceitos.	Promover a leitura dos problemas e suas respectivas resoluções; Oportunizar o debater com o grande grupo.

Plano Períodos	Conteúdos	Objetivos	Estratégia Metodológica
5º Plano 2 períodos	Efeito fotoelétrico	Compreender a interação da luz com a matéria; Entender a relação da frequência com o efeito fotoelétrico	Aulas expositivas utilizando o recurso de <i>slides</i> e o texto de apoio: Efeito Fotoelétrico. Entrega dos problemas abertos
6º Plano 4 períodos	Efeito fotoelétrico	Compreender a interação da luz com a matéria; Entender a relação da frequência com o efeito fotoelétrico; Reconhecer a aplicabilidade do efeito fotoelétrico no dia a dia. Avaliar o entendimento dos conceitos.	Fomentar a leitura dos problemas e suas respostas; viabilizar o debate das respectivas respostas com o grande grupo.

Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 4 - Planejamento do Produto Educacional

Planos Períodos	Conteúdos	Objetivos	Estratégia Metodológica
7º Plano 2 Períodos	Modelo atômico de Bohr; Espectro de emissão e absorção.	Revisar os modelos atômicos e aprofundar a compreensão do modelo atômico de Bohr através da abordagem do espectro de emissão e absorção.	Aulas expositivas utilizando o recurso de <i>slides</i> , vídeo e entrega dos problemas abertos.
8º Plano 4 Períodos	Modelo atômico de Bohr; Espectro de emissão e absorção.	Debater e entender as contribuições do modelo atômico de Bohr para a ciência; Perceber a importância e a aplicação da análise espectral; Avaliar o entendimento dos conceitos.	Promover a leitura dos problemas e as resoluções de cada grupo; articular o debate das respostas com o grande grupo.
9º Plano 2 Períodos	Dualidade onda-partícula	Identificar a dualidade onda-partícula	Aulas expositivas utilizando o recurso de <i>slides</i> e entrega dos problemas abertos.

Planos Períodos	Conteúdos	Objetivos	Estratégia Metodológica
10º Plano 2 Períodos	Dualidade onda-partícula	Identificar e reconhecer o comportamento onda-partícula; Avaliar o entendimento dos conceitos.	Promover a leitura dos problemas e suas respostas; fomentar o debate das respectivas respostas com o grande grupo.
11º Plano 2 Períodos	Radiação eletromagnética; Lei de Planck Efeito fotoelétrico Espectro de emissão e absorção; Dualidade onda-partícula	Retomar, revisar e reavaliar o entendimento dos conceitos já trabalhados.	Entregar o questionário inicial para os grupos; promover um debate sobre suas perguntas; solicitar a formulação e resolução de um problema.
12º Plano 2 Períodos	Radiação eletromagnética; Lei de Planck; Efeito fotoelétrico Espectro de emissão e absorção; Dualidade onda-partícula	Retomar, revisar e reavaliar o entendimento dos conceitos já trabalhados.	Promover a apresentação dos problemas abertos elaborados pelos grupos. Debater as respostas e os enunciados dos problemas com o grande grupo.

Fonte: elaborado pela autora.

1º Plano: Aplicação do questionário investigativo e a apresentação da proposta didática

1º Momento: Aplicar o questionário investigativo para detectar os subsunçores.

Qual a importância do questionário investigativo?

O questionário investigativo permite perceber as concepções prévias, ou seja, os subsunçores dos alunos sobre Física Quântica. Ou seja, ao identificar as concepções prévias, organiza-se o ponto de partida do trabalho permitindo

reorganizar, elaborar e evoluir tais concepções, através do conhecido para o desconhecido.

Questionário Investigativo

- 1) Qual é a distinção entre a Física Clássica e a Física Moderna?
- 2) Quais fatores contribuíram para o surgimento da Física Quântica?
- 3) Qual é o significado da palavra *quantum*?
- 4) Atualmente, a maioria das portas de lojas, *shoppings* e supermercados abrem automaticamente devido a um sensor fotoelétrico. Como funciona tal dispositivo?
- 5) Como ocorre a identificação da composição química das estrelas?
- 6) Como um astrofísico pode saber se uma determinada estrela está se afastando ou se aproximando da Terra?

2º Momento: Após aplicar o questionário, o professor deverá conversar com a turma a respeito da metodologia de resolução de problemas abertos e frisar que ao resolver uma questão aberta não existe uma solução única a ser encontrada, e sim, algumas possíveis soluções que devem ser construídas e melhoradas ao longo do processo.

Para a resolução dos problemas, os alunos utilizarão a biblioteca e o laboratório de informática da escola para realizar as investigações pertinentes. Nessa conversa inicial, deve-se alertar ainda sobre os cuidados necessários na busca de informação na internet. No decorrer do trabalho, é necessário que o professor se mantenha atento sobre as diferentes fontes de informações utilizadas pelos estudantes, no intuito de orientar e desenvolver neles o hábito de serem cautelosos e criteriosos em suas buscas. Ademais, o docente deverá alertar sobre a importância do trabalho colaborativo, pois a metodologia será desenvolvida e avaliada através da organização de grupos.

A explicação da metodologia é fundamental para obter o comprometimento e a compreensão necessária dos alunos para o desenvolvimento do trabalho.

2º Plano: Contexto histórico do final do século XIX e início do século XX

Leitura do artigo: Início de uma moderna revolução (anexo A). Através da abordagem histórica, o artigo esclarece quais foram os fatores que contribuíram para o surgimento da Física Quântica, enfatizar as diversas contribuições de físicos para o seu desenvolvimento e suas implicações para a sociedade. Assim, o aluno terá uma percepção geral dos assuntos que serão abordados e sua importância para o atual desenvolvimento tecnológico.

Para desenvolver esta leitura, é aconselhável que o docente já tenha analisado as respostas obtidas no questionário investigativo. Dessa maneira, conseguirá estabelecer relações entre os conhecimentos prévios dos alunos com as informações abordadas no artigo e enfatizar as concepções equivocadas ou desconhecidas com o objetivo de elucidá-las no decorrer da leitura.

3º Plano: Fatores que contribuíram para o despertar do pensamento quântico

1º Momento: Através de uma aula expositiva dialogada, revisar o espectro eletromagnético abordando a diferenciação das radiações que o compõem, os conceitos de frequência, comprimento de onda e os conceitos matemáticos básicos utilizados na definição de ondas eletromagnéticas. Essa revisão tem o objetivo de auxiliar a compreensão da definição de corpo negro. Assim, após a revisão inicial, será abordada a definição de corpo negro e a incompatibilidade entre os resultados experimentais e as previsões decorrentes com a Física Clássica para o espectro de emissão do mesmo, evento conhecido como catástrofe do ultravioleta e a explicação dada por Planck para resolvê-la.

As aulas expositivas são organizadas através do recurso didático de *slides* e, no primeiro momento da aula, o aluno deverá receber o material dos *slides* organizado na forma de um texto bem detalhado (Apêndice C).

2º Momento: Solicitar aos alunos a organização dos grupos por afinidade de trabalho e orientar que, na medida do possível, os grupos permaneçam inalterados no decorrer da metodologia para melhor avaliá-los.

Após a organização dos grupos, os alunos deverão ser encaminhados para o laboratório de informática ou biblioteca da escola, onde será entregue a cada grupo seu primeiro problema aberto.

O objetivo dos primeiros problemas é desenvolver a habilidade de resolver questões abertas e trabalhar com os conceitos da Física clássica, como o modelo ondulatório para as radiações eletromagnéticas, a radiação térmica e o conceito de corpo negro. Tais conceitos servem para abordar algumas lacunas da física clássica e iniciar os estudos da física moderna.

Problemas Relacionados à Teoria Quântica

- 1) Em um determinado local da superfície interna do bulbo de vidro de uma lâmpada de incandescência instalada em um soquete fixo, surge, após muito tempo de uso, uma mancha escura e com certo espelhamento. Qual é a origem dessa mancha? (GUALTER; NEWTON; HELOU, v. 3, 2013, p.283)
- 2) Partindo do fato de que todos os corpos irradiam energia, explique por que normalmente não conseguimos enxergar pessoas e alguns corpos no escuro? (GUIMARÃES; Piqueira; Carron, v. 3, 2016, p.205)
- 3) Entre as várias linhas de estudo da matéria, como composição, estrutura, temperatura, alguns cientistas investigam a maneira como a matéria absorve e emite luz. Esses estudos também contribuem para o entendimento acerca da estrutura da matéria. O padrão característico de comprimento de onda emitido por uma fonte luminosa é chamado espectro.

A maioria das informações que temos sobre as galáxias e estrelas vem do estudo dos seus espectros. Imagine-se no ano de 1868, você é um astrofísico e faz parte de uma equipe de pesquisadores que acaba de descobrir um novo elemento químico nunca antes observado na Terra. Compartilhe essa experiência com seus colegas. Como ocorreu a descoberta desse elemento, qual é o elemento e como é possível afirmar que o elemento ainda não foi detectado na Terra?

- 4) Alguns detergentes de roupas anunciam que seus produtos deixam as roupas ainda mais brancas, mas isso se trata, realmente, de limpar profundamente o tecido e eliminar manchas por completo?
- 5) O mar e o céu aparentam ser azuis na maior parte do tempo, pois o ar atmosférico reemite, fundamentalmente, o componente azul da luz solar. Assim, a cor de um objeto está relacionada com o comprimento de onda reemitido (espalhado), inicialmente interpretado como o resultado dos processos de absorção e a reflexão da luz. A afirmação muito comum de que os corpos negros não emitem luz é verdadeira? Justifique sua resposta.

Orientação para o professor:

Trabalhar com questões abertas é oportunizar a aprendizagem por investigação. O enfoque investigativo proporciona ao aluno compreender, relacionar e redefinir os conceitos trabalhados em aula através da pesquisa, da análise da informação e da interpretação e organização do pensamento. Para o professor, possibilita o entendimento de como o aluno organiza e estrutura o seu conhecimento e quais são as dificuldades encontradas no processo. Assim, o professor terá a oportunidade de orientar e influir no questionamento que remete a aprendizagem durante a resolução dos problemas.

4º Plano: Aprofundando os conceitos através da resolução dos problemas.

O professor deverá solicitar que cada grupo apresente seu problema e a solução encontrada. Ao término de cada apresentação, cabe ao professor organizar e incentivar o debate e a troca de opiniões para explorar, reorganizar e melhorar a solução encontrada pelos grupos. Ademais, deverá retomar os conceitos trabalhados na aula expositiva, estabelecendo relações entre o conceito e suas aplicações.

No primeiro problema, a ideia central é a liberação de átomos de tungstênio devido ao aquecimento do filamento. Para resolvê-lo, é necessário considerar o conceito de *quantum* e a emissão de porções discretas de energia. Essas concepções

devem nortear o debate, permitindo aprofundar e compreender a aplicação do conceito de *quantum*.

No segundo problema, é essencial a compreensão do espectro eletromagnético e a análise da região do infravermelho. Essa questão também possibilita revisar e reinterpretar o conceito de corpo negro durante o debate.

O terceiro problema trabalha com o estudo da espectroscopia já abordado no questionário investigativo. Para melhor aproveitamento da questão, é aconselhável retomar a quinta pergunta do questionário e relacioná-la ao problema.

Na quarta questão, estão presentes os conceitos de fosforescência e fótons de absorção e emissão de energia. Esse é o problema de maior complexidade dessa sequência, e oportuniza um longo debate ao longo do qual todos os fenômenos mencionados convergem para um único conceito primordial: o de espalhamento da radiação.

O quinto problema, que retoma novamente o conceito de corpo negro e ondas eletromagnéticas, também oferece uma excelente oportunidade para aprofundar o entendimento sobre a natureza da radiação.

Orientação para o professor:

É importante prever a realização de certo intervalo de tempo entre a investigação e a apresentação da solução do problema para a melhor organização e estudo da resolução por parte dos grupos. Nessa perspectiva, ocorrerá uma semana de intervalo entre a resolução e a apresentação. A apresentação da solução do problema é um momento rico que possibilita a troca de ideias, permitindo identificar quais são as dúvidas e percepções equivocadas que necessitam ser retomadas e quais conceitos serão aprofundados.

5º Plano: Efeito Fotoelétrico

1º Momento: Abordar o efeito fotoelétrico através de uma aula expositiva e dialogada com o recurso didático de *slides* e texto de apoio (apêndice D) que deverá ser entregue no primeiro momento da aula para o aluno. No decorrer da aula, é apropriado organizar uma reflexão sobre as incoerências das explicações do efeito

através da visão da física clássica e a contribuição de Albert Einstein para elucidar o efeito utilizando a ideia de *quantum*. O efeito fotoelétrico trata da emissão de elétrons por placas metálicas quando iluminada por luz de frequência suficientemente alta. Assim, ao explicar o efeito fotoelétrico, Einstein interpretou a interação entre elétrons e partículas da luz, contribuindo também para o desenvolvimento inicial da Física Quântica.

2º Momento: Encaminhar a turma para o laboratório de informática e entregar para os grupos as questões abertas relacionadas ao efeito fotoelétrico.

As questões serão trabalhadas por ordem de complexidade. Inicia-se com o problema que debate o conceito inicial da teoria quântica, seguido da análise da constante de Planck e as aplicações do efeito fotoelétrico para a sociedade. Após, serão abordados os conceitos de função e trabalho, através de problemas que têm como foco principal a frequência da radiação incidente.

Problemas do Efeito Fotoelétrico

- 1) A luz, ou nossas tentativas de compreender seus mistérios, tem uma nobre história. Em 1905, o jovem Albert Einstein, então com apenas 26 anos, propôs algo inusitado que contrariava o senso comum da época. Einstein explicou o efeito fotoelétrico adotando um novo modelo para a luz e as demais radiações eletromagnéticas. Ao explicar fenômenos naturais, Einstein mostrou que a natureza é muito mais estranha do que podemos supor. (Revista Galileu,09/06/2016)

Pela explicação do efeito fotoelétrico e por suas contribuições para a Física teórica, Albert Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921. Por que tais ideias revolucionaram a física do século XX? Quais foram as contribuições do postulado?

- 2) Max Karl Ernst Planck (1858-1947) foi um alemão e físico respeitado por suas contribuições na área da termodinâmica. Realizado em 1900, seu trabalho sobre radiação térmica é considerado o marco de surgimento da física quântica. Para solucionar o problema da radiação térmica, Max Planck utilizou de uma constante em sua publicação. Essa constante, denominada constante de Planck, passaria a ser a marca da nova física

que estava surgindo. A constante de Planck, h , é uma das constantes fundamentais da física, como a velocidade da luz, c , e da gravidade, G , dentre outras. Por que a constante de Planck é considerada um marco para a Física Moderna?

- 3) De acordo, com a teoria de Planck, a energia é emitida em quantidades determinadas de frequências. Como o espectro da radiação térmica emitido por um corpo pode ser contínuo?
- 4) O entendimento do efeito fotoelétrico possibilitou grandes avanços tecnológicos. Hoje está presente em várias aplicações cotidianas. Busque entender e explicar três aplicações do efeito fotoelétrico.
- 5) O entendimento do efeito fotoelétrico possibilitou grandes avanços tecnológicos e está presente em várias aplicações do cotidiano. Explique como o efeito fotoelétrico é utilizado para abrir portas automáticas quando alguém se aproxima?
- 6) Que relação pode ser feita entre o efeito fotoelétrico e a fotossíntese? A cor verde das folhas tem algum significado? Explique. (GASPAR, v. 3, 2014, p. 2013)
- 7) Por que seria impossível para um material fluorescente emitir luz ultravioleta quando iluminado por luz infravermelha?
- 8) O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá por mais intensa que seja a radiação. Por que existe frequência de corte para o efeito fotoelétrico? (Parcialmente extraído, GUALTER; NEWTON; HELOU, v. 3, 2013, p.275)
- 9) O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá, por mais intensa que seja a radiação, com a exceção dos metais alcalinos (sódio, potássio, lítio etc.), todos os outros metais requerem frequências iguais ou superiores à radiação ultravioleta para que o fenômeno ocorra. Por que os metais alcalinos são exceção nesse fenômeno? (Parcialmente extraído, GUALTER; NEWTON; HELOU, v. 3, 2013, p.275)

Orientação para o professor:

Neste segundo momento de resolução das questões, o docente deverá distribuir um ou dois problemas por grupo de acordo com as observações realizadas anteriormente. Com o objetivo de amenizar ou sanar as dificuldades demonstradas em cada grupo na primeira etapa como, por exemplo, dificuldade de interpretação, de analisar e explorar diferentes fontes de informação ou relacionar os conceitos trabalhados com sua aplicabilidade. Nesse sentido, cada problema tem objetivo e complexidade diferente para melhor desenvolver as habilidades desejadas.

6º Plano: Aprofundando o conhecimento através da resolução dos problemas

O professor deverá solicitar que cada grupo apresente seu problema e a solução encontrada. Ao término de cada apresentação, cabe ao professor organizar e incentivar o debate e a troca de opiniões para explorar, reorganizar e melhorar a solução encontrada pelos grupos. Ademais, deverá retomar os conceitos trabalhados na aula expositiva, estabelecendo relações entre o conceito e suas aplicações.

O primeiro problema tem o objetivo de discutir a explicação do efeito fotoelétrico através das concepções da física moderna. Esse problema, de fácil compreensão, visa a desenvolver a habilidade de explorar diferentes fontes de informações e analisá-las.

A segunda questão oportuniza uma revisão conceitual sobre as principais constantes fundamentais da física e retoma o conceito de “quantum” de energia por intermédio do significado físico e histórico da constante de Planck.

O terceiro problema trata a relação entre a quantização da energia e a percepção de energia contínua. Essa questão de média complexidade trabalha principalmente a habilidade de interpretar o conceito contínuo *versus* descontínuo e estabelecer relações entre eles.

O quarto problema aborda as contribuições do entendimento do efeito fotoelétrico à sociedade e a compreensão das células fotoelétricas. É um problema de fácil compreensão e visa a desenvolver a habilidade de explorar diferentes fontes de informações e analisá-las. Durante a apresentação da solução, é possível debater outras aplicações do efeito fotoelétrico não contemplado pelo grupo.

A quinta questão tem o objetivo de retomar a pergunta elaborada no questionário investigativo e sua compreensão, ou seja, entender o funcionamento dos sensores de luz. A questão de fácil compreensão trabalha a habilidade de explorar e interpretar informações e também oportuniza retomar e aprofundar o debate da quarta questão.

O sexto problema aborda a compreensão da relação entre energia e frequência e da frequência da radiação incidente necessária para obter o efeito fotoelétrico.

O sétimo problema aborda a relação entre a energia da radiação incidente e sua frequência. A questão permite retomar e aprofundar o debate da sexta questão.

A oitava questão debate o conceito da função trabalho no efeito fotoelétrico. Essa questão permite retomar e aprofundar novamente a relação entre energia e frequência.

O nono problema aborda o potencial de ionização dos metais. Sendo o problema mais complexo dessa sequência, proporciona um longo debate que permite revisar e aprofundar todos os conceitos já trabalhados.

Orientação para o professor:

De acordo com Vegnaud, o domínio de certo campo conceitual é um processo lento e progressivo. Por esse motivo, é fundamental lembrar os conceitos e estabelecer conexões entre os conteúdos já trabalhados e sua aplicabilidade. Assim, a cada resolução apresentada, é uma nova oportunidade de retomar conceitos.

Ademais ao término da apresentação, o grupo deverá citar as fontes de pesquisa, oportunizando a reflexão sobre a busca de informações tão importante para desenvolver a habilidade de pesquisar.

7º Plano: Revisando e aprofundando o conhecimento sobre Modelos Atômicos

1º Momento: Com o propósito de fornecer subsídios para a resolução das questões abertas, organizou-se uma revisão inicial sobre os modelos atômicos de Thomson e Rutherford: na sequência, aprofunda-se o diálogo no primeiro modelo do átomo quantizado proposto por Bohr. Esta aula expositiva tem o objetivo de demonstrar

a evolução dos modelos atômicos e a contribuição de diferentes cientistas para esta percepção, para tanto se utiliza o recuso de *slides* e o texto de apoio para o aluno (apêndice E).

2º Momento: De acordo com a avaliação realizada no quinto e no sexto planos da metodologia, deve-se entregar uma questão aberta para cada grupo com o objetivo de atenuar tais dificuldades e após encaminhar a turma para o laboratório de informática.

Através dos problemas, serão retomados os conceitos de radiação do corpo negro, quantização da energia, efeito fotoelétrico e também serão abordadas as ideias do modelo atômico de Bohr e o espectro de emissão e absorção.

Problemas de Espectro de absorção e de Emissão – Modelo atômico de Bohr

- 1) Com base no modelo atômico de Bohr, o que ocorre quando um fóton incide sobre um átomo, e o que impede que os elétrons não percam energia continuamente, ao percorrer uma trajetória em espiral convergente, que culmina com um processo de colisão contra o núcleo?
- 2) Na virada do século XIX para o século XX, ocorreu grande empenho dos cientistas para estudar o corpo negro. Por que tal empenho? Quais são as contribuições desse estudo para a sociedade?
- 3) Com todas as opções modernas e mais eficientes de lâmpadas lançadas nos últimos anos, a lâmpada incandescente pode ter perdido parte de sua popularidade, mas continua sendo uma das maiores invenções de Thomas Edison. Em 1879, uma lâmpada feita com algodão carbonizado dentro de um bulbo a vácuo brilhou por 45 horas seguidas e representou o início da “**Era da Eletricidade**”, substituindo o uso de velas, lampiões a gás e tochas de madeira. (Extraído da revista Galileu 14/02/2017)
Ao observar os vários modelos de lâmpadas que existem atualmente e comparando a luminosidade de uma fluorescente e uma de LED de mesma potência, percebe-se que a de LED possui uma luminosidade maior. Por quê?
- 4) Antes do advento das modernas teorias de interação radiação-matéria, como a descrita pelo modelo de Boltzmann, os físicos chamavam de

espalhamento o efeito de desvio das trajetórias de partículas, provocados por colisões com alvos massivos. Por exemplo, quando você inicia uma partida de sinuca jogando a “bola branca” nas demais, inicialmente juntas, causa o espalhamento delas. Em 1923, observou-se um interessante efeito. Ao incidir ondas eletromagnéticas, tais como raios-X ou gama sobre um elétron, este sofria um espalhamento. Que propriedade das ondas eletromagnéticas, descobertas no início do século XX, estava sendo observada indiretamente? Explique.

- 5) Max Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918 por descobrir que a energia é quantizada. Do ponto de vista prático, existem diversas evidências de que a energia é de fato quantizada. Basta considerar, por exemplo, o fenômeno de mudança de fase. Neste sentido, por que a água, ao ser aquecida, entra em ebulição (fervura), ao invés de expandir continuamente até atingir o estado de vapor?

8º Plano: Aprofundando o conhecimento através da resolução dos problemas

Solicitar que cada grupo apresente seu problema e solução. Ao término de cada apresentação, o professor deverá incentivar o debate, a troca de informações, revisar e aprofundar os conceitos já abordados.

O primeiro modelo propõe uma revisão sobre os estados estacionários do átomo e a interação entre elétrons e partículas, também oportuniza rever o efeito fotoelétrico. Essa questão de complexidade intermediária permite melhorar a habilidade de interpretar diferentes fontes de informação.

A segunda questão visa a aprofundar o conceito de corpo negro e a estabelecer relações entre o conceito e suas aplicabilidades. Desenvolve a habilidade de buscar, interpretar e relacionar a informação com o conteúdo.

A terceira questão, mais ampla e complexa, permite demonstrar a contribuição da física quântica para a sociedade, através do desenvolvimento das lâmpadas de LED. Explora o funcionamento das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, permite revisar o conceito de potência, resistência, debater o custo-benefício de cada lâmpada, aprofundar o debate sobre o funcionamento do LED e conceito de polarização reserva e direta.

O quarto problema possibilita rever historicamente os comportamentos físicos associados a partícula e onda, posteriormente, visa a retomar a nova visão na perspectiva quântica.

O quinto problema permite ampla revisão de todos os conceitos já trabalhados e aprofunda o conceito de emissão da radiação e sua interação com a matéria.

9º Plano: As ideias básicas da Física Quântica

1º Momento: Por intermédio do recurso didático de *slides* e texto de apoio (apêndice F), iniciar a aula com uma revisão histórica do conceito de luz até a compreensão de que as características de onda e partícula são complementares e nunca se manifestam simultaneamente. Destacar que a interpretação da função de onda de Schrödinger está relacionada com a probabilidade da partícula de assumir um dado estado quântico e relacionar essa compreensão com o Princípio da Incerteza de Heisenberg. Finalizar essa aula expositiva através da análise retrospectiva das ideias básicas da física quântica.

2º Momento: Encaminhar os grupos para o laboratório de informática e distribuir os últimos problemas para os grupos, conforme as dificuldades apresentadas e avaliadas nos planos sétimo e oitavo.

A finalidade dos últimos problemas é abordar os conceitos da dualidade onda-partícula e ampliar o debate sobre os conceitos da aplicabilidade da física quântica na sociedade.

Problemas referentes à Dualidade Onda-Partícula

- 1) A luz, ou melhor, nossas tentativas de compreender seus mistérios, tem uma nobre história. Em 1905, Albert Einstein, então com apenas 26 anos, propôs algo inusitado, que contrariava o senso comum da época. Einstein explicou o efeito fotoelétrico adotando um novo modelo para a luz e as demais radiações eletromagnéticas. Ao explicar fenômenos naturais, Einstein mostrou que a natureza é muito mais estranha do que podemos supor. (Extraído da Revista Galileu 09/06/2016). Quais evidências

comprovam a natureza ondulatória da luz e da natureza corpuscular da luz? Exemplifique.

- 2) Por que as fotografias de um livro ou revistas parecem granuladas quando são ampliadas?
- 3) Estufas são recintos fechados com paredes e teto transparentes a luz. As de vidro são utilizadas principalmente em países de inverno rigoroso para o cultivo de verduras, legumes e flores. Por que o vidro é transparente à luz visível e parcialmente opaco às ondas de calor?
- 4) Não se sabe ao certo quando surgiram as primeiras lentes. A partir do século XIII, porém, iniciou-se na Itália sua fabricação regular. As lentes são um componente óptico de vital importância, participando individual ou coletivamente de quase todos os instrumentos ópticos. Ao observar uma lâmina de vidro fina ou uma mais espessa percebe-se diferença em suas tonalidades. Por que as lâminas finas são translúcidas e as espessas são suavemente esverdeadas?
- 5) Existem características químicas e físicas comuns a diferentes elementos. Por que os materiais bons condutores de calor também são bons condutores de eletricidade?
- 6) Os polímeros são utilizados desde a antiguidade pela humanidade. Utilizou-se como revestimento impermeabilizante, aumentando a durabilidade dos móveis por várias décadas. Os processos para a obtenção sintética dos polímeros foram possíveis a partir do século XX. A grande diversidade e aplicação do material revolucionaram a indústria. É possível existir polímeros condutores? Explique.
- 7) Uma das grandes fontes da radiação ultravioleta é o Sol. Assim, para os dias de veraneio na praia, é fundamental a escolha correta do guarda-sol. Imagine-se em uma loja para comprar um guarda-sol, quais modelos escolher para filtrar os raios ultravioleta e por que tais modelos filtram os raios?

Orientação para o professor

Como pode ser observada, a complexidade dos problemas aumenta progressivamente a cada etapa. Os últimos problemas foram elaborados no intuito de aprofundar os debates e revisar todos os conceitos explorados no decorrer das aulas. Novamente, os grupos que apresentam maiores dificuldades na resolução anterior deverão receber dois problemas como oportunidade de superá-las.

10º Plano: Aprofundando o conhecimento através da resolução dos problemas

Solicitar que cada grupo apresente seu problema e a solução desenvolvida.

O foco da primeira questão é uma revisão histórica sobre a luz, retomando e aprofundado o debate da aula anterior.

O segundo problema permite reinterpretar a dicotomia conceitual “contínuo *versus* descontínuo” e estabelecer relações entre esses conceitos. Como essa dicotomia já foi abordada no terceiro problema, a saber, no efeito fotoelétrico, é oportuno lembrá-lo estabelecendo relações. Também devem-se explorar os conceitos de pixel e resolução de imagens.

A terceira questão revisa o processo de propagação de calor por radiação, os conceitos de comprimento e frequência de onda, as características da natureza do vidro e os conceitos de absorção e reflexão da luz.

O quarto problema permite aprofundar as concepções trabalhadas na questão anterior e debater sobre as trajetórias irregulares dos feixes de luz.

O quinto problema propicia estabelecer um paralelo entre as abordagens da física clássica e moderna para a característica de condução dos materiais.

Na sexta questão, oportunizar a percepção dos conceitos quânticos para o desenvolvimento de novos materiais, debater o conceito de dopagem e condutibilidade eletrônica.

A sétima questão aborda novamente o conceito de emissão de radiação e sua interação com os diferentes materiais utilizados na fabricação do guarda-sol, tais como: nylon, algodão, lona, fibras sintéticas. Também é importante abordar a espessura e tonalidade do material.

11º Plano: Revisão dos conceitos trabalhados

1º Momento: Iniciar a aula com um debate, visando a retomar os conceitos já trabalhados e a estabelecer conexões entre teoria e aplicabilidade.

2º Momento: Após o debate, será entregue outro questionário investigativo, retomando as questões do primeiro e abordando outras questões.

Questionário Investigativo

- 1) Qual é a distinção entre a Física Clássica e a Física Moderna?
- 2) Quais fatores contribuíram para o surgimento da Física Quântica?
- 3) Qual é o significado da palavra *quantum*?
- 4) Cite quatro contribuições da Física Quântica para a sociedade moderna.
- 5) Explique com suas palavras o conceito de dualidade onda-partícula.
- 6) Por que a Física Quântica é considerada a física de probabilidade?
- 7) Atualmente, a maioria das portas de lojas, *shoppings* e supermercado abre automaticamente devido a um sensor fotoelétrico. Como funciona tal dispositivo?
- 8) Como ocorre a identificação da composição química das estrelas?
- 9) O primeiro modelo do átomo quantizado é proposto por Bohr. A nova compreensão do átomo é baseada na teoria proposta pelo físico Schrödinger, que descreve a natureza quântica por meio de uma equação de onda. Explique duas incoerências do modelo atômico proposto por Bohr.
- 10) Como um astrofísico pode saber se uma determinada estrela está se afastando ou se aproximando da Terra?

3º Momento: Solicitar a elaboração e resolução de um problema aberto por grupo, marcar a apresentação para a próxima semana de aula.

Orientação para o professor:

A atividade investigativa tem dois objetivos. O primeiro é analisar a contribuição da metodologia para a construção do conhecimento, e o segundo é demonstrar isso ao próprio aluno, pois, algumas vezes, o aluno se sente desmotivado por não conseguir perceber seus avanços. Assim, ao entregar os dois questionários, ele poderá comparar suas respostas iniciais e finais, assim como perceber seu desenvolvimento. Isso é fundamental para elevar a sua autoestima e incentivá-lo a prosseguir nos estudos.

O terceiro momento tem o objetivo de verificar se a metodologia colabora para desenvolver a habilidade de formular problemas.

12º Plano: Debatendo e reorganizando ideias através da elaboração e apresentação dos problemas

Solicitar a cada grupo a apresentação do seu problema. Incentivar o debate e a troca de informações. Após o término das apresentações, entregar os questionários investigativos e conversar com a turma sobre sua percepção da metodologia.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO INVESTIGATIVO

- 1) Qual é a distinção entre a Física Clássica e a Física Moderna?
- 2) Quais fatores contribuíram para o surgimento da Física Quântica?
- 3) Qual é o significado da palavra *quantum*?
- 4) Atualmente, a maioria das portas de lojas, *shoppings* e supermercado abre automaticamente devido a um sensor fotoelétrico. Como funciona tal dispositivo?
- 5) Como ocorre a identificação da composição química das estrelas?
- 6) Como um astrofísico pode saber se uma determinada estrela está se afastando ou se aproximando da Terra?

APÊNDICE C – TEXTO DE APOIO PARA ALUNOS: ORIGENS DA TEORIA QUÂNTICA

No final do século XIX e início do século XX, várias questões continuavam sem respostas, por exemplo, a absorção dos espectros de elementos químicos, a variação da forma dos espectros e a radiação emitida por corpos aquecidos. Vários foram os esforços de muitos físicos experimentais e teóricos para explicar o comportamento da matéria nas escalas atômicas e subatômicas, utilizando a Física Clássica. Entretanto, algum fato sempre ficava sem explicação. A Física Clássica torna-se inadequada para descrever os fenômenos em escala microscópica.

Espectro eletromagnético

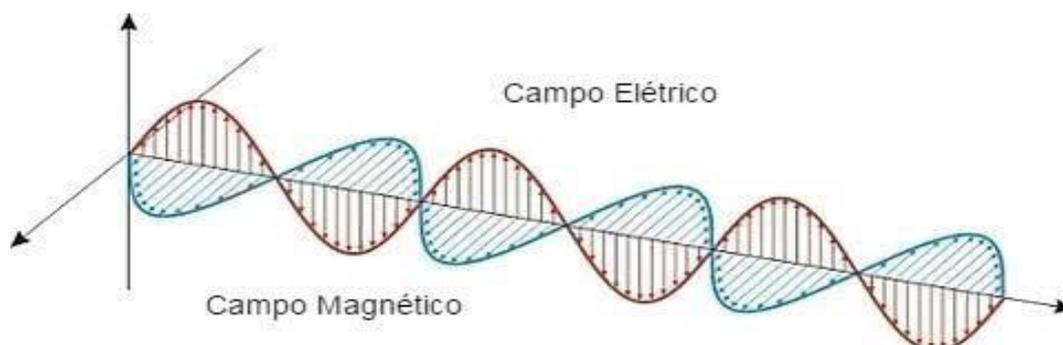
James Clerck Maxwell estabeleceu, em 1865, quatro equações que unificou os fenômenos elétricos e magnéticos. A partir das equações, é possível concluir que:

- Um campo elétrico \vec{E} , variável com o tempo, induz o surgimento de um campo magnético $\vec{\beta}$.
- Um campo magnético $\vec{\beta}$, variável com o tempo, induz o surgimento de um campo elétrico \vec{E} .

Ou seja: *Um campo elétrico variando com o tempo dá origem a um campo magnético, e um campo magnético variando no tempo dá origem a um campo elétrico.* Um poderá ar origem ao outro, tornando possível a existência e a propagação de ambos.

Segundo a teoria de Maxwell, as ondas eletromagnéticas são geradas por cargas elétricas aceleradas, por exemplo, elétrons oscilantes.

Figura 1 - Representação do campo elétrico e magnético



Fonte: Física Ilustrada (s.d.).²

Observa-se que os campos elétrico \vec{E} e magnético \vec{B} são variáveis com o tempo e o espaço e perpendiculares entre si.

A velocidade de propagação dessas ondas no vácuo foi calculada por Maxwell por meio das suas equações.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Sendo ϵ_0 e μ_0 respectivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no vácuo e seus valores são:

$$\epsilon_0 = 8,85148 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \text{ e } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A}$$

Assim, o módulo da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo é tomado, por definição, como sendo exatamente:

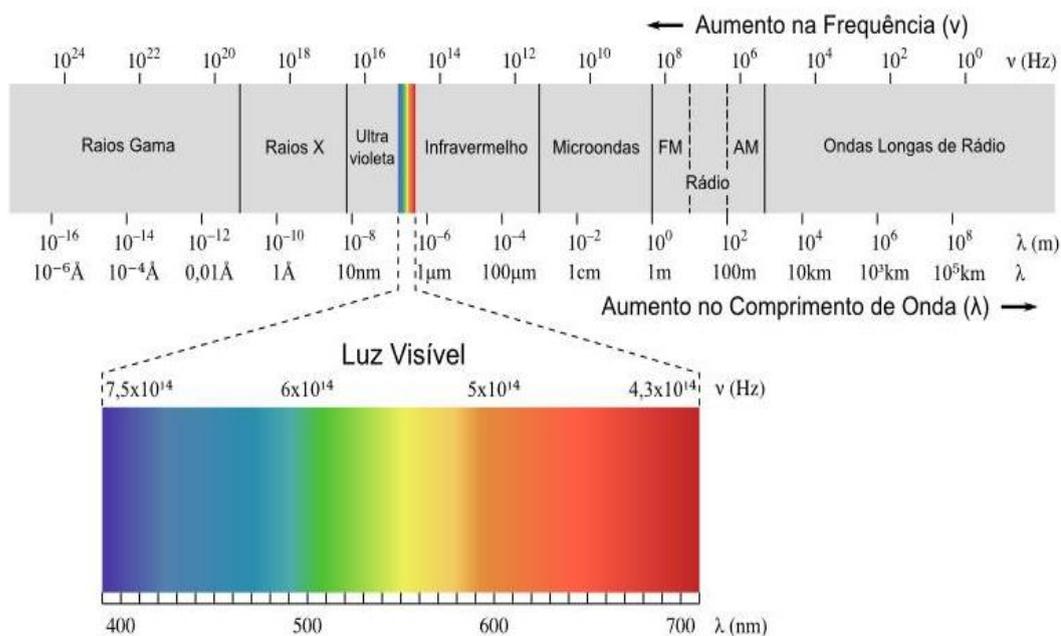
$$C = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Percebe-se que o valor encontrado coincidiu com o valor da velocidade da luz. Maxwell conclui que a luz visível também é uma onda eletromagnética. Em 1889, Heinrich Rudolf Hertz conseguiu produzir e detectar as ondas eletromagnéticas de rádio em laboratório confirmando a previsão teórica de Maxwell. As ondas eletromagnéticas podem se propagar num meio material e também no vácuo, o espectro das ondas é contínuo. As principais faixas do espectro eletromagnético são:

² FÍSICA ILUSTRADA. Disponível em: <<http://fisicailustrada.blogspot.com/search/label/Ondas%20eletromagn%C3%A9ticas>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

raios gamas, raios-X, ultravioleta, luz, infravermelho, micro-ondas, ondas de TV e ondas de rádio FM e AM. Todas as ondas eletromagnéticas transportam energia e é tanto maior essa energia quando menor for o comprimento de onda (λ).

Figura 2 - Espectro Eletromagnético



Fonte: Todo Matéria (s.d.).³

Portanto, assim como é possível produzir ondas mecânicas na água utilizando uma pedra, é possível produzir ondas eletromagnéticas no ar mediante a variação de uma corrente elétrica, do movimento de uma carga elétrica, de um campo elétrico ou magnético. A frequência das ondas produzidas é igual à frequência da fonte.

Radiação de um corpo negro

Radiação é o processo de transferência de calor por intermédio de ondas eletromagnéticas.

Todo corpo está emitindo e absorvendo energia na forma de radiação térmica.

Um corpo em temperatura ambiente emite radiação eletromagnética de todos os comprimentos de onda, porém as radiações emitidas na faixa do visível transportam pouca energia que não sensibilizam nossos olhos. A aproximadamente

³ TODO MATÉRIA. Disponível em: <http://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico>. Acesso em: 20 jun. 2019.

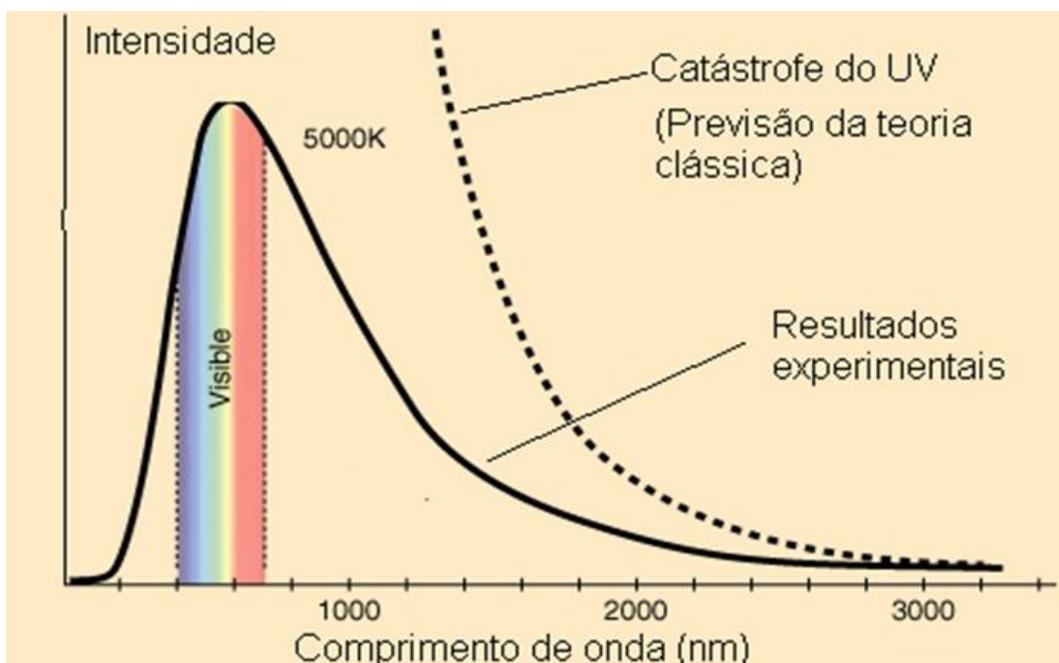
em 850 K, as radiações eletromagnéticas emitidas na faixa que corresponde à cor vermelha têm energia suficiente para sensibilizar os olhos, e o corpo parece ter uma cor vermelha escura. À medida que a temperatura aumenta, aumenta também a quantidade de energia das radiações eletromagnéticas, então, para os olhos humanos, a cor do corpo depois da cor vermelha escura, em sequência, são as cores vermelho vivo, laranja, amarelo, azul e branco.

Em outras palavras, a frequência da radiação emitida por um corpo depende apenas de sua temperatura, independe de quaisquer outras características do corpo, tais como: massa, volume e até da sua própria cor.

Assim, por definição, um corpo negro é um corpo ideal capaz de absorver toda a radiação que nele incide. Se o corpo absorve todas as frequências da radiação nele incidente, ele também emite todas as frequências.

Espectros contínuos são produzidos por sólidos, líquidos ou gases incandescentes, estes últimos mantidos a pressões muito altas. A temperatura da fonte é determinada pela análise do espectro.

Figura 3 - Catástrofe do UV



Fonte: Física Contexto & Aplicações (s.d.)⁴

⁴ FÍSICA CONTEXTO & APLICAÇÕES. Disponível em: <<http://fisicacontextoaplicacoes.blogspot.com/2016/07/a-fisica-do-seculo-xx.html>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

Acima, o gráfico da intensidade I da radiação do corpo negro em função do comprimento de onda λ demonstra que o previsto pela teoria eletromagnética de Maxwell é muito diferente dos resultados obtidos por meio de experimentos, principalmente na região dos comprimentos de ondas menores. Além disso, percebe-se que a intensidade da radiação tende ao infinito.

Exaustivamente analisado no final do século XIX, o espectro de emissão do corpo negro foi o primeiro exemplo da incompatibilidade entre os resultados experimentais e as previsões decorrentes com a Física Clássica. Essa discrepância ficou conhecida como “a catástrofe do ultravioleta”.

Assim, através do ramo da física térmica e dos estudos de Planck, que procurava descrever o espectro contínuo de um corpo negro, em 1900, nasceu a Mecânica Quântica.

A teoria de Planck

Max Karl Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão, começou a estudar a radiação do corpo negro em 1897, como já foi visto antes, foi encontrada grande divergência entre os resultados experimentais da intensidade da radiação de um corpo negro. Planck buscou uma expressão matemática que se ajustasse aos dados experimentais e depois uma justificativa para uma função puramente matemática. No dia 19 de outubro de 1900, no Seminário de Física da Universidade de Berlim, Planck divulgou uma teoria para contornar o problema. Além de audaciosa, ela conflitava drasticamente com a teoria clássica.

Como na agitação molecular ocorrem oscilações dos portadores de cargas elétricas e emissão de ondas eletromagnéticas, Planck associou osciladores harmônicos (sistemas que oscilam com frequências bem definidas) na superfície do corpo às cargas elétricas dentro das moléculas e estabeleceu as seguintes condições:

- a energia de cada oscilador harmônico não poderia ter um valor qualquer, mas somente múltiplos de um valor fundamental;
- a energia irradiada por um oscilador não é contínua; ela se manifesta de forma discreta, por meio de pulsos, ou **quanta**. A energia é emitida quando um oscilador passa de um estado quantizado para outro;

- a menor quantidade de radiação de energia é o **quantum**. Essa energia E emitida pelos átomos de corpos aquecidos assumia apenas valores inteiros proporcionais à frequência f de vibração desses átomos. Para cada frequência, a energia mínima que poderia ser emitida seria dada pela expressão:

$$E = h \cdot f$$

Sendo h a constante de Planck de valor aproximado $6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$. Portanto, a emissão ou absorção de energia por oscilador só pode ter valores múltiplos sendo:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Sendo que n é um número inteiro (1, 2, 3,...), chamado número quântico.

Em sua teoria, Planck também considerou que os oscilantes existentes na superfície do corpo só emitem ou absorvem energia quando passam de um estado quântico para outro.

Se um oscilador passa, por exemplo, de $n = 2$ para $n = 1$, **emite** uma porção discreta de energia. Se passar de $n = 4$ para $n = 5$, **absorve** uma porção discreta de energia.

Portanto, a emissão e absorção de energia também ocorrem em quantidades quantizadas.

Cada porção discreta de energia recebeu o nome de *quantum*, palavra do latim cujo plural é *quanta*. Por isso a teoria de Planck é conhecida por Teoria dos *Quanta*. A concepção do *quantum*, que em 1926 também passou a ser chamado de **fóton**, foi tão bem-sucedida que possibilitou resolver outras questões insolúveis por conceitos clássicos. A partir da teoria dos *quanta*, foi obtida uma função para a radiação do corpo negro, em excelente concordância com os resultados experimentais. Pelo seu trabalho, Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1918.

REFERÊNCIAS

BISCUOLA, Gualter José. **Física**. 2.ed. São Paulo, 2013, v. 3.

GASPAR, Alberto. **Compreendendo a física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2013.

GUIMARÃES, Oswaldo. **Física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2016, v. 3.

GEF-UFSM. **Física Moderna**. Santa Maria: Pallotti, 2010.

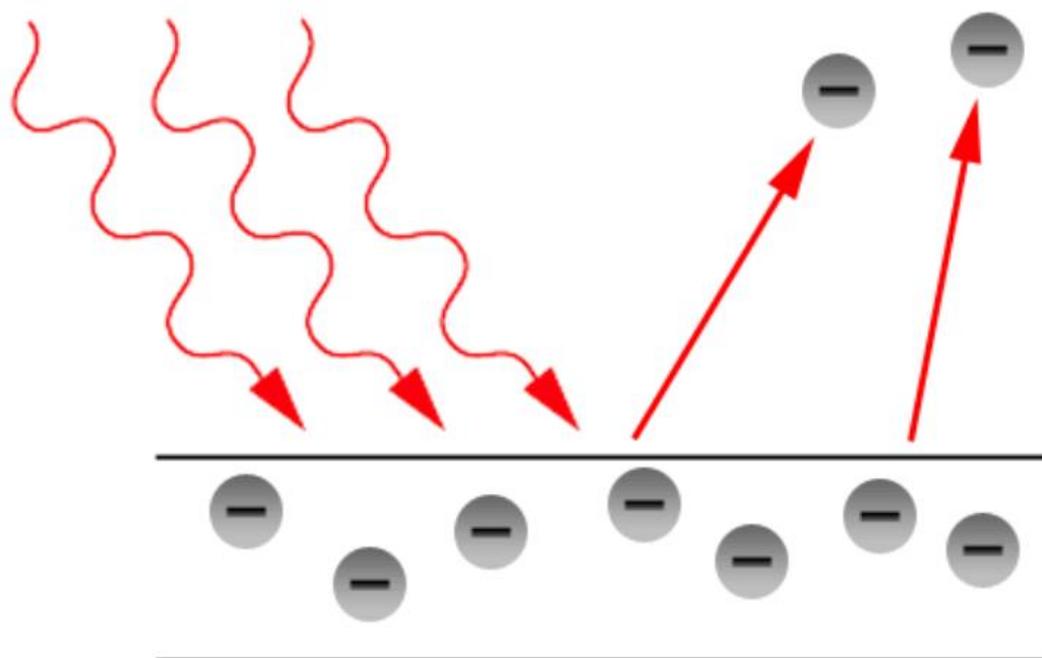
APÊNDICE D – TEXTO DE APOIO PARA ALUNOS: EFEITO FOTOELÉTRICO

Constatando experimentalmente no final do século XIX, o efeito fotoelétrico é outro exemplo da incompatibilidade dos resultados experimentais com a Teoria Eletromagnética Clássica.

O efeito fotoelétrico foi descoberto por Hertz em 1887, observando que a intensidade da descarga elétrica entre dois eletrodos aumentava quando fazia incidir, sobre eles, radiação ultravioleta, assim:

Quando radiações eletromagnéticas incidem numa placa metálica, cargas elétricas podem absorver energia suficiente para escaparem dela: a esse fato se dá o nome de efeito fotoelétrico.

Figura 4 - Radiações eletromagnéticas incidindo em uma placa metálica

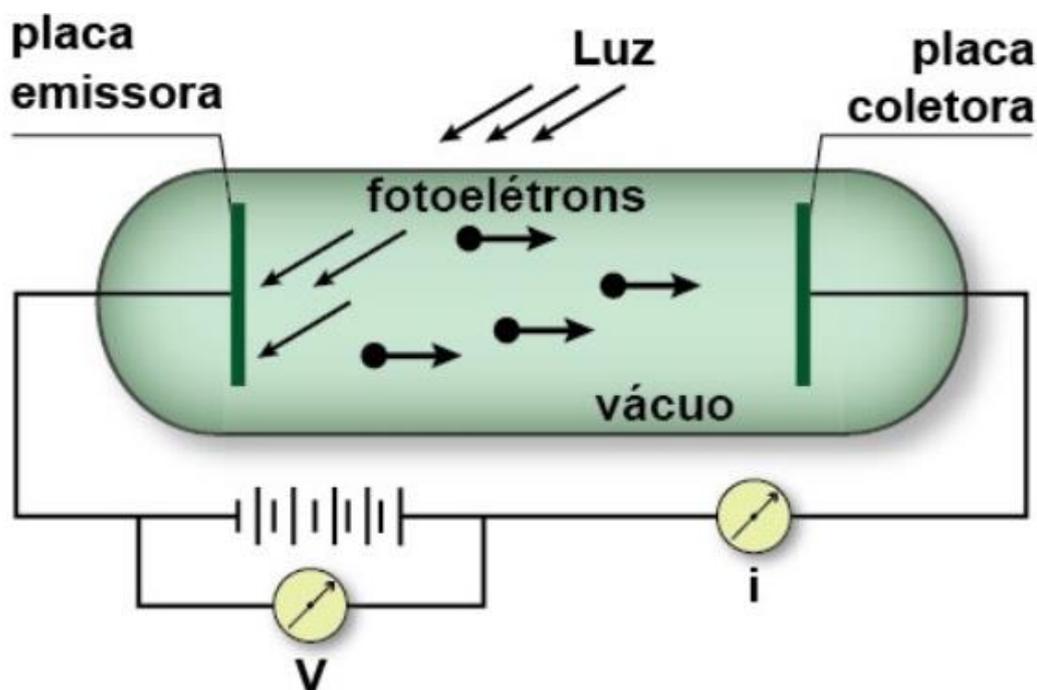


Fonte: Wikipédia (s.d.).⁵

O físico alemão Philipp Lenard, assistente de Hertz na época, trabalhou para esclarecer tal efeito. Para tanto, construiu um aparato composto de duas placas metálicas submetidas a uma diferença de potencial e mantidas a vácuo no interior de uma ampola de vidro, semelhante ao da figura abaixo:

⁵ WIKIPÉDIA. Efeito Fotoelétrico. s.d. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_fotoel%C3%A9trico#/media/Ficheiro:Photoelectric_effect.png>. Acesso em: 20 jun. 2019.

Figura 5 - Efeito Fotoelétrico



Fonte: Wade (2018).⁶

Observa-se na figura uma luz monocromática que incide sobre o cátodo (placa conectada ao polo negativo da bateria) que libera elétrons, esses por sua vez são atraídos pelo ânodo (placa conectada ao polo positivo da bateria). Esse movimento dos elétrons produz uma corrente elétrica extremamente pequena.

As conclusões de Lenard, com este experimento, são as seguintes:

1º: A quantidade de cargas despreendidas da placa emissora durante o efeito fotoelétrico é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente, ou seja, quanto maior a intensidade da luz incidente, maior a quantidade de cargas emitidas.

Comentário: Isso pode ser explicado pela Teoria Eletromagnética Clássica de Maxwell. A intensidade de uma onda qualquer é definida como a quantidade de energia que passa por unidade de tempo, através de uma superfície de área unitária perpendicular à direção de propagação da onda. Assim como a energia absorvida pela placa por unidade de tempo aumenta com o aumento da intensidade da radiação eletromagnética incidente, aumenta também, por unidade de tempo, o número de

⁶ WADE, Elton. **A interpretação quântica e relativística da natureza** - as ciências naturais e a matemática no mundo atual. Conscientização do espectro autista. Cap. III. Efeito Foto Elétrico. **Medium**, 6 jan. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/@eltonwade/cap%C3%ADtulo-3-efeito-fotoel%C3%A9trico-3de7f9fd9416>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

elétrons que absorvem energia suficiente para escapar da placa. Dessa forma, como a corrente é a quantidade de carga que atravessa uma superfície de área unitária na unidade de tempo, com o aumento da intensidade da radiação, aumenta a corrente elétrica no circuito.

2º: A energia cinética adquirida pelas cargas arrancadas da placa fotossensível depende apenas da frequência da luz incidente, e não de sua intensidade.

Comentário: O resultado descrito não pode ser explicado pela teoria ondulatória de Maxwell. De acordo com a teoria clássica, para uma radiação mais intensa, ou seja, brilho da luz mais forte, a mesma quantidade de elétrons é atingida, em um mesmo intervalo de tempo, por uma energia total maior. Assim, os elétrons, por absorverem continuamente a energia incidente, deveriam escapar com energias cinéticas maiores, o que não acontece.

3º: Por menor que seja a intensidade da radiação causadora do efeito fotoelétrico, o fenômeno é quase instantâneo: a radiação incide na placa e, imediatamente, elétrons são extraídos. Experimentos realizados em 1928 levaram à conclusão de que 10^{-9} s é o limite superior do tempo de espera.

Comentário: Esse é outra característica que a teoria clássica não explica. Pela Teoria da Ondulatória, quando uma onda eletromagnética atravessa uma região da placa onde se encontra um elétron, este deveria oscilar com uma dada frequência, movido pela força de interação com o campo elétrico variável da onda. Com o passar do tempo, e por efeito da transferência de energia da onda para o elétron, a amplitude das oscilações do elétron deveria crescer até o ponto em que ele se desligaria do material e seria ejetado. No caso das radiações pouco intensas, o cálculo clássico para o tempo que deveria durar tal processo é de minutos ou horas.

4º: O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente estiver acima de certo valor mínimo, que depende do metal utilizado. Se isso não for respeitado, o efeito não ocorrerá, por mais intensa que seja a radiação.

Comentário: Também não é possível explicar esse fato por meio da teoria de Maxwell.

A contribuição de Albert Einstein para o Efeito Fotoelétrico

A explicação de Einstein para o assunto tem relação direta com o estudo da radiação de um corpo negro elaborado por Planck. O seu objetivo, no artigo publicado em 1905, era adotar um novo modelo para a luz e as demais radiações eletromagnéticas. Essa explicação que dá sentido físico à hipótese de quantização da energia, o efeito fotoelétrico foi o fenômeno que Albert utilizou para justificar a hipótese principal de seu trabalho. Para frisar em sua biografia escrita pelo autor Walter Isaacson:

Einstein mostrou como a existência desses quanta de luz poderia explicar o que ele elegantemente chamou de “trabalho pioneiro” de Lenard sobre o efeito fotoelétrico. Se a luz vinha em quanta discretos, então a energia de cada um era determinada simplesmente pela frequência da luz multiplicada pela constante de Planck. Se admitirmos, sugeriu Einstein “que um quantum de luz transfere sua energia inteira a um único elétron”, então se segue que a luz de uma frequência mais alta faria o elétron ser emitido com mais energia. Por outro lado, aumentar a intensidade da luz (mas não a frequência) significa simplesmente que mais elétrons seriam emitidos, mas a energia de cada um seria a mesma. (ISAACSON, 2007. p.115)

Assim, Albert Einstein supôs que a energia de um fóton (*quantum*) é dada por:

$$E=hf$$

Sendo:

h = Constante de Planck. No SI, $h = 6,63 \times 10^{-34}\text{s}$

f = Frequência

Quando uma radiação de frequência incide em uma placa metálica, ocorrem colisões entre os fótons da radiação e os elétrons do metal. Em cada uma dessas colisões, um fóton pode fornecer toda sua energia a um único elétron. Se essa energia absorvida pelo elétron, que depende da frequência da radiação, for suficiente, ele será extraído; do contrário, permanecerá no metal. A energia mínima para extrair um elétron do metal é denominada função trabalho (Φ), e seu valor está relacionado com a característica de cada metal.

Pela equação abaixo, pode-se concluir:

$$E_{m\acute{a}x.} = h \cdot f - \Phi$$

$E_{m\acute{a}x}$ é a energia máxima (energia cinética), ou seja, é a energia máxima do elétron ejetado na superfície;

f é a frequência da radiação incidente;

Φ é a função trabalho, energia mínima necessária para o elétron escapar do metal.

Importante: Referente à unidade de energia, utiliza-se o **elétron-volt (eV)**

No quadro abaixo, alguns valores, em **eV**, da função trabalho (Φ) de alguns metais.

Quadro 5 - Alguns valores, em **eV**, da função trabalho (Φ) de alguns metais

Metal	Potássio	Sódio	Zinco	Ferro	Platina
Φ (eV)	2,24	2,28	4,31	4,50	6,35

Fonte: Biscuola, (2015, p.271).

Retomando as observações de Lenard e explicando através da Teoria Quântica

1º: O número de elétrons arrancados é diretamente proporcional à intensidade da radiação eletromagnética incidente.

Comentário: A intensidade de uma onda qualquer é definida como a quantidade de energia que passa por unidade de tempo, através de uma superfície de área unitária perpendicular à direção de propagação da onda. A intensidade da radiação eletromagnética depende da frequência da onda e, portanto, um aumento em sua intensidade representa um aumento no número de fótons, promovendo um aumento do número de interações destes fótons com os elétrons da placa e por consequência um aumento no número de elétrons ejetados.

2º A diferença de potencial de corte é a mesma qualquer que seja a intensidade da radiação eletromagnética incidente.

Comentário: Através da equação da função trabalho, percebe-se que a diferença de potencial de corte é uma característica do material da placa, ou seja, independe da frequência incidente, isto é, não depende do número de fótons que incidem na placa por unidade de tempo e por unidade de área.

3º A energia dos elétrons arrancados depende da frequência, e não da intensidade da radiação eletromagnética incidente.

Comentário: A radiação eletromagnética deve ser considerada como um conjunto de fótons, cada qual com uma energia $E = hf$, ou seja, a energia está diretamente relacionada com a frequência da onda, e não com a sua intensidade.

4º Não existe retardo entre o instante em que a radiação eletromagnética atinge a superfície da placa e o instante em que aparecem os elétrons arrancados.

Comentário: O conceito de partícula está associado à transferência instantânea de energia de um ente físico a outro, numa colisão. Assim, considerando os fótons como partículas, a Teoria Quântica garante que existe uma transferência de energia instantânea aos elétrons.

REFERÊNCIAS

BISCUOLA, Gualter José. **Física**. 2.ed. São Paulo, 2013, v. 3.

GASPAR, Alberto. **Compreendendo a física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2013.

GUIMARÃES, Oswaldo. **Física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2016, v. 3.

GEF-UFSM. **Física Moderna**. Santa Maria: Pallotti, 2010.

ISAACSON, Walter. **Einstein: sua vida, seu universo**. São Paulo: Companhia das Letras, 2007.

APÊNDICE E – TEXTO DE APOIO PARA OS ALUNOS: MODELOS ATÔMICOS

No final do século XIX, o elétron já estava estabelecido com partícula fundamental. Foi o físico britânico Joseph John Thomson, em 1897, que descobriu os elétrons como parte constituinte do átomo, através da confirmação de que os raios catódicos são formados por feixes de minúsculas partículas com cargas negativas de mesmo valor. Ao comprovar que as partículas eram desviadas na presença de um campo magnético ou de um campo elétrico e através da direção e do sentido em que essas partículas eram desviadas, Thomson concluiu que essas partículas têm carga elétrica negativa e chamou-as de elétrons.

Com os resultados de sua pesquisa, Thomson estabeleceu um modelo físico para o átomo, que ficou conhecido como Pudim de Passas, pois, para ele, o átomo era um pudim positivo no qual estavam incrustadas passas negativas distribuídas de tal forma que o conjunto era eletricamente neutro. Pelo seu estudo da descarga elétrica em gases e pela descoberta do elétron, em 1906, Thomson recebeu o Prêmio Nobel de Física.

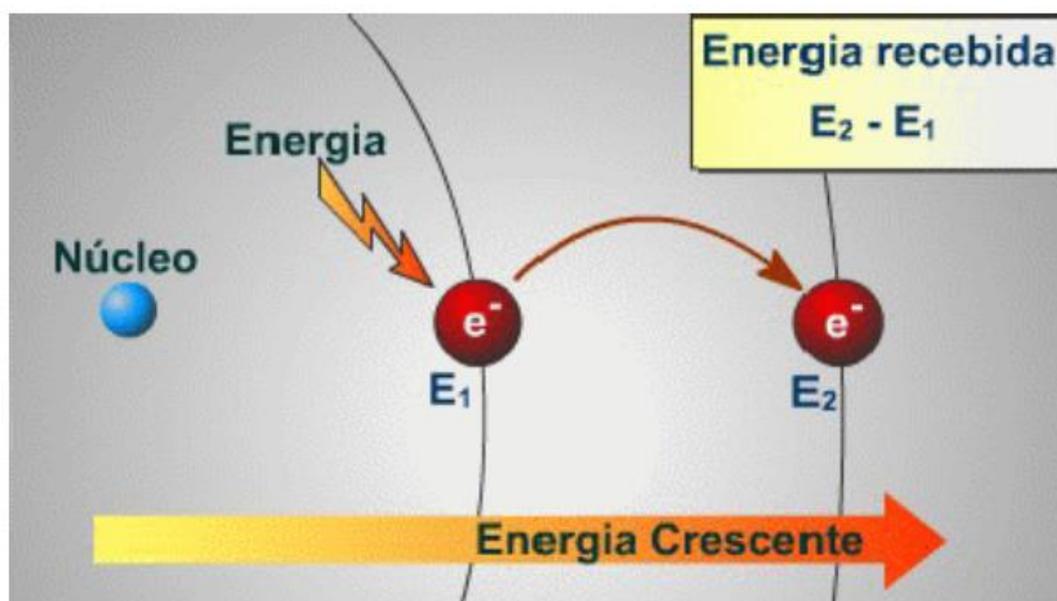
O modelo de Thomson foi abandonado em 1911, com a descoberta da existência do núcleo atômico, por Rutherford. A partir de suas observações realizadas, ele propôs um modelo atômico no qual o átomo era quase que totalmente vazio, com um minúsculo *núcleo* maciço, constituído por partículas positivas – os prótons – e uma região externa, a *eletrosfera*, formada por partículas negativas – os elétrons – que giram em torno do núcleo descrevendo órbitas circulares. Esse modelo “planetário” do átomo, entretanto, tem um sério obstáculo a ser resolvido. De acordo com a Teoria Eletromagnética Clássica, uma partícula carregada em movimento acelerado deveria emitir radiação e perder energia. Como resultado dessa perda de energia, um elétron em órbita ao redor do núcleo perderia gradativamente sua energia, e sua órbita não poderia ser estável, mas sim uma espira que terminaria no núcleo. Além disso, um núcleo formado apenas por partículas positivas deveria se desintegrar, pois as cargas elétricas de mesmo sinal se repelem mutuamente. Portanto, o modelo atômico proposto por Rutherford era instável do ponto de vista teórico e não explicava convincentemente a existência duradoura dos átomos.

O modelo de Bohr foi uma tentativa para solucionar a estrutura atômica de Rutherford. Para tanto, em 1913, Bohr aplicou a teoria quântica de Planck e de

Einstein na estrutura atômica de Rutherford e formulou o primeiro modelo *quantizado* do átomo.

Bohr postulou que, para a eletrosfera de um átomo manter-se estável, os elétrons desse átomo só podem ter determinados níveis de energia, denominados *estados estacionários* ou *quânticos*: a cada um desses estados corresponde uma determinada energia. Em seu modelo, Bohr propôs que, em um estado estacionário, o átomo não emite radiação. Assim, sua eletrosfera mantém-se estável. Também postulou que todo átomo, ao passar de um estado estacionário para outro, emite ou absorve um *quantum* de energia igual à diferença entre as energias correspondentes aos dois estados.

Figura 6 - Demonstra que ao absorver um fóton, o elétron passa para um estado excitado

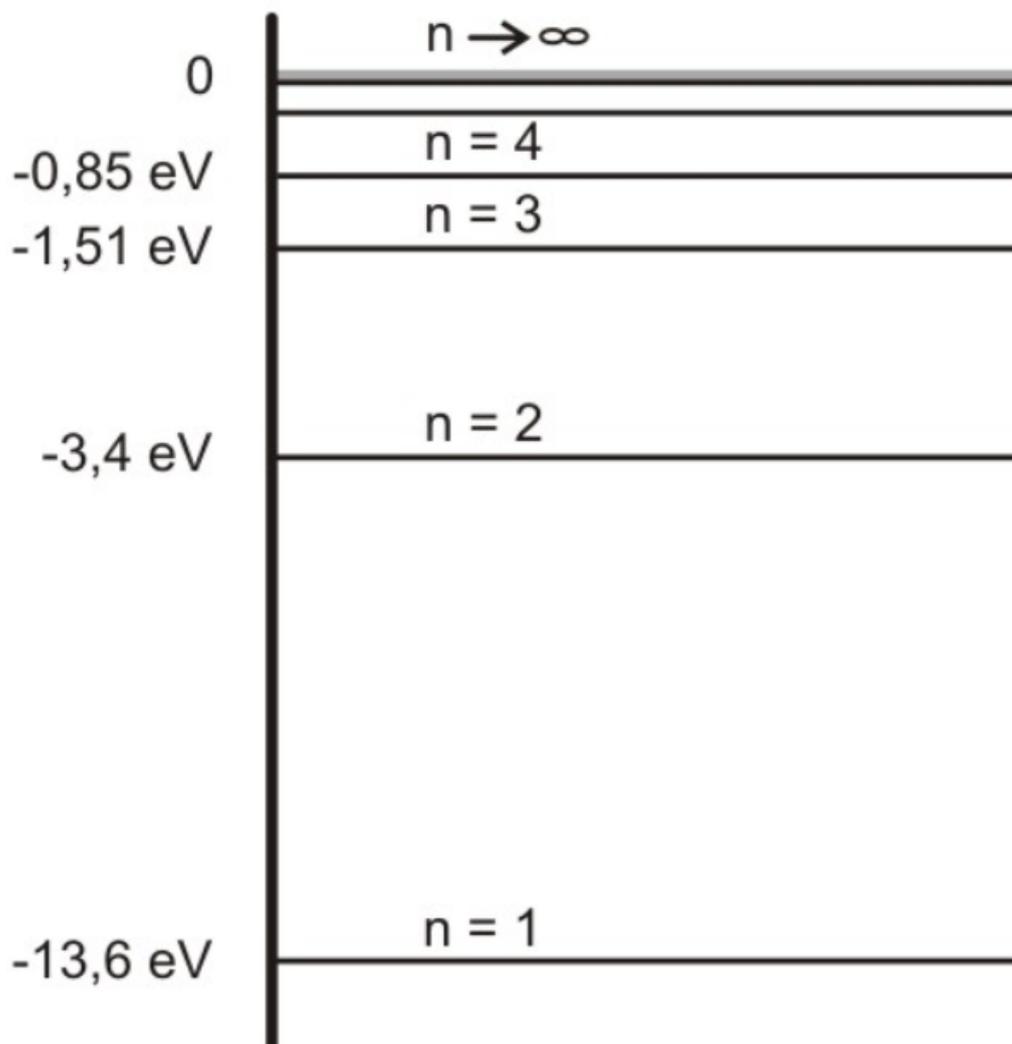


Fonte: Souza (2011).

O fóton é emitido quando a energia inicial é maior do que a energia final; em caso contrário, ele é absorvido. Essa hipótese explica tanto o espectro de emissão quanto o de absorção, pois ambos são descontínuos.

O diagrama de níveis de energia ajuda para a compreensão dos processos de emissão e de absorção de energia pelo átomo. Para o átomo de hidrogênio, no modelo de Bohr, o diagrama é mostrado na figura abaixo:

Figura 7 - Níveis de energia do átomo de Hidrogênio



Fonte: Ferraro (2011).⁷

A dimensão vertical é usada para representar o valor da energia do estado estacionário. A cada estado estacionário é associada uma linha horizontal. A separação entre duas linhas horizontais é proporcional a sua diferença de energia. Como níveis com n maiores de energia, a transição de um estado de n maior para um estado de n menor vem acompanhada da emissão de um fóton, enquanto a transição de um estado de n menor para um estado de n maior vem acompanhada da absorção de um fóton.

⁷ FERRARO, Nicolau Gilberto. O átomo de Bohr. Blog Pessoal, 1º jan. 2011. Disponível em: <<http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2011/01/cursos-do-blog-respostas.html>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

Espectro de Absorção e de Emissão e o Modelo Atômico de Bohr

A quantização da energia de Planck também permitiu a compreensão de outro problema: o espectro de absorção e emissão de um gás. Qualquer gás quando aquecido emite luz, formando um espectro de cores chamado de *espectro de emissão*. Se o gás não é excitado quando iluminado por uma fonte de luz, ele passa a absorver fótons de determinadas frequências, formando o *espectro de absorção*. Já se sabia que os responsáveis pela emissão e pela absorção de fótons são os elétrons dos átomos que compunham esse gás. O problema estava no fato de que, se os elétrons perdem ou ganham energia continuamente, devem emitir ou absorver fótons de todas as frequências, formando um espectro de cores contínuo. No entanto, o que se observa é que tanto os espectros de absorção quanto os de emissão são descontínuos, formando raias. As raias são brilhantes quando o material emite luz e escuras quando o material absorve luz. Essas raias caracterizam os elementos químicos, átomos de um mesmo elemento químico no estado gasoso só podem emitir ou absorver um conjunto de radiações eletromagnéticas de determinada frequência, característico do elemento, como sendo uma espécie de “impressão digital” de cada um deles.

Figura 8 - Espectro de absorção e de emissão do Hidrogênio



Fonte: Oliveira (2015).⁸

⁸ OLIVEIRA, Marcelo A. Leiqui. **O quantum de luz**. Blog Pessoal, 29 mar. 2015. Disponível em: <<http://leiqui.blogspot.com/2015/03/o-quantum-de-luz.html>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

O problema foi resolvido por Bohr em 1913, como visto anteriormente, em seu modelo os elétrons ocupam apenas determinadas órbitas, as quais chamou de estados estacionários, nessas órbitas os elétrons podem girar indefinidamente sem perder energia e, portanto, sem emitir radiação. As órbitas dos estados estacionários também permitem entender os processos de emissão e absorção de radiação pelos elétrons. Se o elétron emite um fóton de determinada frequência (radiação), perde energia, portanto temos o processo de emissão de radiação. Se o elétron absorve um fóton com determinada frequência, ele salta para uma órbita de maior raio, correspondente a um nível de energia também maior, temos o processo de absorção da radiação.

O modelo atômico de Bohr teve sucesso relativo para átomos com apenas um elétron, como o átomo de hidrogênio. Porém, esse sucesso não se repete para átomos com dois ou mais elétrons. Apesar de alguns refinamentos introduzidos no modelo de Bohr, como órbitas elípticas e correções relativísticas, sua aplicabilidade permanece limitada, Contudo, a relação entre os níveis de energia de um átomo e as linhas de seu espectro tem significado real.

REFERÊNCIAS

- BISCUOLA, Gualter José. **Física**. 2.ed. São Paulo, 2013, v. 3.
- FEYNMAN, Richard. P. **Física em seis lições**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004.
- GASPAR, Alberto. **Compreendendo a física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2013.
- GUIMARÃES, Oswaldo. **Física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2016, v. 3.
- GEF-UFSM, **Física Moderna**. Santa Maria: Pallotti, 2010.

APÊNDICE F - TEXTO DE APOIO PARA ALUNOS: DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Desde a Antiguidade, alguns filósofos gregos acreditavam que a luz fosse constituída de pequenas partículas, propagando-se em linha reta com velocidade muito grande. Essas ideias prevaleceram durante vários séculos. Por volta de 1500, Leonardo da Vinci, percebendo a semelhança entre a reflexão da luz e o fenômeno do eco, levantou a hipótese de que a luz, como o som, poderia ser uma onda. No século XVII, duas grandes correntes do pensamento científico defendiam ideias opostas para a natureza da luz. Uma liderada por Newton, favorável à ideia de que a luz era constituída de partícula (modelo corpuscular da luz), e a outra tendo à frente o físico holandês Huyghens, defendendo a hipótese do modelo ondulatório da luz.

Uma onda se comporta como uma perturbação periódica, o seu conteúdo energético está distribuído de modo contínuo no espaço e no tempo e possui propriedades bem definidas como interferência, difração, polarização. Assim, no início do século XIX, o cientista inglês Thomas Young demonstrou experimentalmente a interferência da luz colaborando para o indício de sua natureza ondulatória. Ainda havia a questão sobre qual a grandeza que ondulava. Na metade do mesmo século, os estudos de Maxwell colaboraram para a compreensão da natureza da luz que é a vibração do campo elétrico e magnético. Ou seja, a luz trata-se de uma onda eletromagnética.

No entanto, em 1905, Einstein, ao explicar o efeito fotoelétrico, considerou o conceito de *quantum* de luz, por isso, o novo modelo retoma a natureza corpuscular da luz, como acreditava Newton.

Retomando as ideias, a interferência e a difração da luz, por exemplo, só podem ser explicadas pelo modelo ondulatório. Já o efeito fotoelétrico só pode ser explicado pelo modelo quântico. Ou seja, em alguns experimentos, a luz se comporta com ondas e em outras situações, como partícula. Por outro lado, não se observa a luz com os dois comportamentos simultaneamente. Portanto, os dois modelos são necessários e se complementam. A esse duplo comportamento da luz dá-se o nome de dualidade onda-partícula.

As ideias básicas da Física Quântica

De Broglie estendeu a dualidade onda-partícula, originalmente só atribuída ao fóton, para todas as partículas materiais. Mas como atribuir um comportamento de onda a uma partícula? Atribuindo a equação obtida por Einstein, relacionada a quantidade de movimento do fóton com seu comprimento de onda $q = \frac{h}{\lambda}$ fosse geral, valendo para qualquer partícula. Assim, qualquer partícula material poderia apresentar comportamento ondulatório.

Em 1927, experiências de difração foram efetuadas com elétrons comprovando a hipótese de De Broglie. Ao introduzir um comportamento ondulatório à física quântica, permite-se a compreensão do motivo da quantização. Para qualquer tipo de onda, associamos uma frequência de vibração discreta, por exemplo, uma onda numa corda, confinada em determinada região do espaço, só consegue vibrar num conjunto discreto de frequência. De mesma forma, uma partícula confinada por alguma forma de energia potencial (estados quânticos). A cada estado quântico associamos um nível de energia.

A função de onda (Ψ) de Schrödinger

Com o estabelecimento da natureza ondulatória das partículas, ficou definitivamente claro que seria necessária uma nova teoria para explicar o comportamento da matéria. Com isso, também, um novo modelo para o átomo era necessário; um modelo que estivesse de acordo com a Mecânica Quântica. O físico austríaco Erwin Schrödinger propôs uma equação que representa o comportamento ondulatório. Sua equação permite encontrar a função de onda que descrever o sistema quântico a partir da energia potencial do sistema. Todavia, o desafio era compreender qual o significado físico dessa função. Isso porque a função de onda Ψ não é uma função real, ou seja, trata-se de uma função complexa, isso significa que a Ψ possui uma parte real e uma parte imaginária e que deve ser escrita na forma geral $a + b.i$, onde a e b são funções reais, e i é a unidade imaginária, definida como: $i\sqrt{-1}$. Em 1928, Max Born, utilizando de artifícios matemáticos, propôs essa interpretação para o módulo ao quadrado da função de onda, ou seja, o módulo (valor absoluto) da função ao quadrado é uma função real, não complexa e significa a probabilidade de se encontrar um elétron em

um dado estado. Assim, os lugares mais prováveis de encontrar uma partícula são aqueles onde o módulo do quadrado $|\psi|^2$ da função de onda for maior.

Uma grande consequência dessa descoberta foi que a física quântica mostra que a natureza possui um comportamento estatístico, passando a ser descrita em termos de probabilidades. Assim, não faz sentido falar em trajetória do elétron ou sua posição, pois para cada elétron temos a probabilidade de encontrá-lo em determinada região. Dessa forma, os elétrons não são organizados ao redor do núcleo em órbitas bem definidas, como as propostas por Bohr, mas em regiões em que há certa probabilidade de encontrá-los. Essas regiões são denominadas nuvens eletrônicas ou orbitais.

A função de onda Ψ de uma partícula é uma função contínua ao longo do espaço contendo toda a informação física sobre a partícula, suas interações com a vizinhança e o estado quântico em que ela se encontra. Seu quadrado Ψ^2 mostra onde é provável encontrar a partícula, mas a função de onda, em si, é uma grandeza física abstrata.

O princípio da incerteza de Heisenberg

O aspecto mais marcante da Física Clássica é sua capacidade de prever a posição, velocidade, aceleração de um corpo em qualquer instante de tempo. Ou seja, se conhecermos as condições iniciais do movimento do corpo, sua posição inicial e sua velocidade ou *momentum* linear, podemos determinar através das Leis de Newton, a descrição do movimento em qualquer instante. Por essa razão, quando nos referimos à Mecânica newtoniana, dizemos que ela é determinista. E esse modo determinista de pensar faz parte no nosso cotidiano, por exemplo: quando pensamos em atravessar uma rua, precisamos fazer uma estimativa da distância que temos que percorrer e com qual velocidade para que não sejamos atropelados por um carro. Com a possibilidade de realizar experimentos em escalas atômicas e subatômicas, constatou-se que esse modo de pensar determinista não se aplica nesse caso. Para demonstrar esta diferença, imagine que você precisa encontrar a posição de um objeto no seu quarto, por exemplo, sua carteira que está sobre a sua mesa, no escuro, quando você acende a luz, ilumina todos os objetos, incluindo a carteira. A reflexão da luz na carteira chega aos seus olhos, permitindo que determine, com precisão, a

sua posição. Imagine agora que você quer determinar a posição exata do elétron, em vez de sua carteira. Isso seria impossível, pois como vimos no efeito fotoelétrico, ao iluminar o elétron, o fóton poderia modificar sua posição. Assim, o princípio da incerteza impõe limitações na definição de certas propriedades simultaneamente, de modo que é impossível medir essas grandezas em um mesmo experimento com uma precisão absoluta.

Por exemplo, a posição e a quantidade de movimento formam um par conjugado, tempo e energia são outros. Se conhecermos a posição de uma partícula com grande precisão, sua quantidade de movimento será incerta. Por outro lado, se ganharmos informações sobre a quantidade de movimento da partícula, sua posição será incerta. Outra relação de incerteza envolve o tempo de vida de uma partícula num estado quântico e a incerteza na energia daquele estado.

Como consequência do princípio da incerteza a noção de trajetória não pode existir, se sabemos com exatidão onde uma partícula está, não podemos saber para onde vai e vice-versa. Assim, como já mencionado anteriormente, a órbita do elétron em torno do núcleo não pode existir.

Outro exemplo do princípio da incerteza é o comportamento de difração de um feixe de luz; antes de passar pelo orifício estreito, a posição de um fóton, num plano perpendicular à direção de propagação é incerta. Com isso, a direção a ser seguida é bem definida, e o feixe continua paralelo. No entanto, quando o feixe está passando pelo orifício, a incerteza na posição diminui consideravelmente. Com isso, a direção que ele vai seguir fica incerta; o feixe se curva depois do orifício, deixando de ser paralelo.

Portanto, na Física Clássica, está implícita a ideia de que qualquer grandeza de movimento de uma partícula pode ser medida e descrita de modo exato. De acordo com a Física Moderna, o ato de medir perturba a partícula e modifica o seu movimento. Assim, a Física Moderna trabalha com as interpretações probabilísticas das grandezas envolvidas.

Pensando um pouco além

Através do princípio da complementaridade, Bohr procurou expressar dois comportamentos estranhos que surgem no mundo quântico: a dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza de Heisenberg. Segundo o princípio as duas

descrições de mundo incompatíveis entre si, tais como onda e partículas, são necessárias para permitir a descrição do conjunto dos resultados experimentais, sendo que cada um aparece em um determinado contexto.

Assim, o efeito fotoelétrico é uma das muitas evidências sugeridas ao longo do século XX de que a luz é constituída por partículas (fótons). A dualidade surge em relação ao comportamento coletivo desse feixe de partículas, isto é, um feixe de fótons. Comparativamente, é como uma torcida organizada, ela se compõe de indivíduos perfeitamente identificados com partículas. Mas, durante o jogo, esses indivíduos comportam-se coletivamente de acordo com determinadas regras, seguindo uma espécie de coreografia, como ondas. O que importa é conhecer as regras que regem a transição de uma interpretação que se baseia no caráter individual da luz, corpuscular, para uma interação que leva em conta seu caráter coletivo, ondulatório.

Diante de tudo que foi tratado sobre a Física Quântica, cabe, por fim avaliar os pilares de seu entendimento atual. Uma maneira de compreender seu processo de formação é que ela surge em virtude da quantização de energia presente, por exemplo, no problema da radiação térmica do corpo negro, da forma de a radiação interagir com a matéria no efeito fotoelétrico e do modelo de átomo de Bohr, com órbitas quantizadas. O desenvolvimento da Física Quântica, contudo, mostra que sua essência não está exatamente na quantização da energia. Esse seria um fato decorrente de dois princípios mais gerais: a dualidade onda-partícula e a interpretação probabilística. O primeiro está presente na própria forma de descrever a luz, na energia quantizada e no Princípio da Incerteza. O segundo trata da relação entre observador e medida e de uma forma de se entenderem os fenômenos físicos. Ela seria intrinsecamente probabilística, não obedecendo necessariamente à relação de causa e consequência bem determinadas.

REFERÊNCIAS

BISCUOLA, Gualter José. **Física**. 2.ed. São Paulo, 2013, v. 3.

FEYNMAN, Richard. P. **Física em seis lições**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004.

GASPAR, Alberto. **Compreendendo a física**. 2.ed. São Paulo: Ática, 2013.

GUIMARÃES, Oswaldo. **Física**. 2.ed. São Paulo, Ática, 2016, v. 3.

GEF-UFSM, **Física Moderna**, Santa Maria: Pallotti, 2010

MÁXIMO, Antonio; ALVARENGA, Beatriz. **Curso de Física**. São Paulo: Scipione, 2010, v. 3.

ANEXO A – O INÍCIO DE UMA MODERNA REVOLUÇÃO

O final do século XIX e começo do XX foi uma época de fortes mudanças culturais e científicas, principalmente na Europa. Na transição entre esses séculos, vários movimentos artísticos e culturais deram início ao período que ficou conhecido como modernismo, no qual surgiram grandes transformações nas formas de se expressar por meio da literatura, teatro e artes em geral.

Artistas plásticos como Pablo Picasso (1881-1973) e Henri Matisse (1869-1954) e escritores como James Joyce (1882-1941) e Franz Kafka (1883-1924) fizeram uma ruptura com a forma tradicional da arte e criaram novos estilos e paradigmas. No Brasil, que tem como marco do modernismo a Semana de Arte Moderna de 1922, Tarsila do Amaral (1886-1937), Mário de Andrade (1893-1945) e Oswald de Andrade (1890-1954), entre outros artistas, também revolucionaram os padrões estéticos na literatura e na arte.

Talvez por coincidência (ou não), essa foi a época em que aconteceram as maiores revoluções na física, que romperam de forma brusca os modelos existentes. Ao final do século XIX, a física atingiu um grau de maturidade que dava a impressão de que pouco havia para ser descoberto, e que os novos resultados experimentais apenas levariam ao aprimoramento das teorias vigentes.

É atribuída ao grande físico do século XIX Lorde Kelvin (1824-1907) a citação: “Havia apenas duas nuvens no céu da física.”. Kelvin se referia aos resultados que se mostravam contraditórios aos modelos da física clássica. A primeira nuvem significava a não detecção de um meio material para a propagação da luz. Diversos experimentos realizados não haviam obtido sucesso na tarefa. A segunda nuvem se relacionava com o problema da teoria que explicava a capacidade térmica dos materiais, conhecida como “princípio da equipartição da energia”, que se encontrava claramente em desacordo com os novos resultados experimentais que surgiam na época.

Kelvin, em 1901, percebeu que de certa forma a física clássica estava atingindo o seu limite e que necessitaria de um novo avanço. Como sabemos, essas nuvens se transformaram em verdadeiras tempestades que modificaram completamente a paisagem da física, influenciando-nos de maneira profunda até os dias atuais.

O primeiro dos problemas apresentados por Kelvin seria resolvido com a teoria da relatividade proposta pelo físico Albert Einstein (1878-1957) em 1905. A solução do segundo está associada com o surgimento da física quântica.

O nascimento da física quântica

Uma situação bastante comum é a emissão de radiação eletromagnética (luz) por um corpo aquecido. Essa emissão ocorre em um largo espectro contínuo de frequências e apresenta um nível máximo que depende da temperatura do corpo que está emitindo.

Os nossos corpos, que normalmente estão na temperatura de 36°C , têm esse máximo na região conhecida como infravermelho. É essa faixa de radiação que nos permite ter a sensação térmica de “calor”. Atualmente, existem muitas câmeras que conseguem filmar com ausência de luz, justamente captando essa radiação dos corpos.

Um pedaço de ferro, por exemplo, quando aquecido a uma temperatura da ordem de 600°C , começa a adquirir uma coloração avermelhada. Já em um forno de uma indústria siderúrgica, ele apresenta uma cor azulada em temperaturas mais elevadas. A superfície do Sol, que está na temperatura de aproximadamente 6.000°C , emite radiação na faixa do espectro visível, incluindo também o infravermelho e o ultravioleta (que sabemos ser prejudicial a nossa pele se recebido em grandes quantidades).

O aspecto curioso é que a “cor” que os corpos adquirem ao serem aquecidos dessa maneira não depende do material de que eles são constituídos, mas apenas da temperatura.

No entanto, a máxima frequência que o corpo emite não pode ser explicada pela física clássica. Para haver concordância entre os resultados experimentais e a teoria, foi necessário introduzir um novo conceito na física, que levou a uma das suas mais importantes revoluções.

A introdução do conceito do *quanta*

Em dezembro de 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1957) propôs uma expressão para explicar o comportamento da emissão de radiação de um corpo negro. Para tal, ele sugeriu que a energia emitida pelo corpo seria um múltiplo de um número inteiro multiplicado pela frequência da radiação e por uma constante (que posteriormente foi chamada de constante de Planck). Sem nos apegarmos aos detalhes matemáticos dessa expressão, Planck propôs, pela primeira vez, que a energia era emitida de maneira discreta ou, como dizemos atualmente, de forma “quantizada”.

Na época, a proposta de Planck não causou grande impacto. Somente em 1905, quando Albert Einstein introduziu o conceito de “*quanta* de luz” (fóton), é que essa teoria ganhou mais força. Na proposta de Einstein, a luz (e qualquer forma de radiação eletromagnética) se comporta como se fosse pequenos pacotes de energia, proporcionais à constante de Planck.

Com essa hipótese, Einstein pôde explicar o chamado efeito fotoelétrico, segundo o qual quando iluminamos um metal com luz em uma determinada frequência surge uma corrente elétrica. Einstein pôde explicar por que a corrente somente aparecia para uma determinada frequência. O efeito fotoelétrico é aplicado em muitos sensores, por exemplo, nas células fotoelétricas que controlam o acendimento das lâmpadas na iluminação pública.

Conceito fundamental na natureza

A constante de Planck é uma das constantes fundamentais da natureza. Devido ao seu pequeno valor ($6,6 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$), faz com que os fenômenos quânticos sejam apenas percebidos na escala do átomo. A descoberta de Planck é considerada por muitos historiadores como o início da física quântica.

A proposta de Planck também concorda muito bem com os resultados experimentais quando se observa a radiação residual do universo quando ele tinha aproximadamente 300 mil anos de idade, chamada de “radiação de fundo cósmico”. Essa radiação é a prova mais forte de que houve o evento do Big Bang, que teria dado início ao universo que conhecemos hoje.

Descoberta pelos físicos Arno Penzias (1933-) e Robert Wilson (1936-) em 1964, essa radiação equivale a uma temperatura de aproximadamente 2,7 K (-270°C). Na década de 1990, foi feito um levantamento dessa radiação em função de sua frequência pelo satélite Cobe, da NASA. Os resultados obtidos concordam com enorme precisão com a expressão obtida por Planck.

Quando Planck propôs sua expressão para explicar a emissão de radiação de um corpo aquecido, não estava querendo revolucionar a física. Ele considerava que sua proposta era uma tentativa desesperada de conciliar a teoria com os dados experimentais.

Ao apresentar sua teoria em 1900, Planck tinha 42 anos e já possuía uma carreira acadêmica consolidada. Antes de morrer, em 1957, aos 99 anos, o físico pôde ver o surgimento da física quântica e as transformações que provocou no mundo. Praticamente quase toda a nossa tecnologia é decorrente do conhecimento mais profundo da matéria que a física quântica nos proporcionou. Planck não imaginava o alcance que a sua proposta teria. Da mesma forma que a arte, quando realizamos uma descoberta ou criamos uma nova teoria, quase nunca temos noção do alcance que ela terá.

Autor: Adilson de Oliveira

Revista Ciência Hoje 19/10/2009