



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE NACIONAL (PROFQUI)



**SEQUÊNCIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM BASEADA NA RESOLUÇÃO DE
PROBLEMAS PARA O ESTUDO DE RADIOATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO**

MÁRCIO LUCAS FERREIRA MAIA

RECIFE/PE

2025

MÁRCIO LUCAS FERREIRA MAIA

**SEQUÊNCIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM BASEADA NA RESOLUÇÃO DE
PROBLEMAS PARA O ESTUDO DE RADIOATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, como requisito para o título de Mestre em Química pelo Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional.

Orientador: Prof. Dr. Lucas dos Santos Fernandes

Coorientadora: Prof. Dr^a. Angela Fernandes Campos

RECIFE/PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

M287s Maia, Márcio Lucas Ferreira.
Sequência de ensino e aprendizagem baseada na resolução de problemas
Para o estudo de radioatividade no ensino médio / Márcio Lucas Ferreira Maia. -
Recife, 2025.
144 f.: il.

Orientador(a): Lucas dos Santos Fernandes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa
de Pós-Graduação em Mestrado Profissional em Química em rede Nacional
(PROFQUI), Recife, BR-PE, 2025.
Inclui referências e apêndice(s).

1. Química – Estudo e ensino. 2. Fissão nuclear. 3. Fusão nuclear. 4. Ensino.
5. Aprendizagem. 4. Metodologia. I. Fernandes, Lucas dos Santos, orient.
II. Título

CDD 540

AGRADECIMENTOS

Inicio este momento agradecendo a Deus, pois sem sua presença e propósito em minha vida, eu não teria alcançado esta importante etapa da minha trajetória.

Agradeço profundamente à minha família, pilar essencial em todos os momentos da minha vida. Sem vocês, eu certamente não teria chegado até aqui. Aos meus irmãos, cunhadas, sobrinhos e tios, sou grato por compreenderem minha personalidade e particularidades, e por sempre me incentivarem a buscar o sucesso educacional.

Em especial, agradeço aos meus pais, que mesmo não tendo acesso a níveis de escolaridade além da educação básica, sempre ensinaram a meus irmãos e a mim que a educação seria o caminho para uma vida profissional estável e digna.

Com o coração apertado, elevo minha mais sincera gratidão à minha querida e saudosa mãe, que nos deixou em janeiro de 2025. Se hoje cheguei até aqui, foi graças ao seu amor incondicional, à sua fé em mim e ao incentivo constante que nunca me faltou. Ela me conhecia profundamente e sabia da importância que este caminho teria para que eu alcançasse respeito e felicidade. Amo-te eternamente, minha mãe.

Agradeço também aos profissionais e estudantes da ETE Epitácio Pessoa, onde desenvolvi minha pesquisa, pela colaboração e disponibilidade durante este processo.

Aos meus orientadores Dr. Lucas dos Santos Fernandes e à Dr^a. Ângela Fernandes Campos, registro minha gratidão pela paciência, orientação generosa e riqueza de conhecimentos que compartilharam comigo ao longo deste percurso.

Aos meus colegas de turma, agradeço pela partilha de experiências, pela compreensão e pelo apoio mútuo que cultivamos.

Por fim, agradeço aos amigos da praia de Gaibu e a tantos outros que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, escuta e compreensão nos momentos de aflição e ansiedade. Cada palavra, cada gesto e cada presença foram fundamentais para que eu seguisse em frente.

A cada um de vocês, meu muito obrigado!

RESUMO

Os processos radioativos fazem parte da realidade mundial e boa parte da sociedade, por não os conhecer com profundidade, os teme. Diante desse cenário, uma das funções do ensino é levar conhecimento à população visando a formação de cidadãos críticos e conscientes e que possam participar da tomada de decisões baseados em conhecimentos e evidências científicas. Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar as contribuições da metodologia de ensino por resolução de problemas para aprendizagem de fissão e fusão nuclear e suas aplicações em uma turma de estudantes do Ensino Médio. Os processos radioativos de fissão e fusão nuclear podem ser usados para fins benéficos ou para a produção de armas nucleares. Tendo em vista essas aplicações, este estudo construiu e aplicou uma sequência didática baseada na resolução de problemas destacando os níveis teórico, fenomenológico e representacional do conhecimento químico. Esta investigação consiste em uma pesquisa qualitativa do tipo interventiva de aplicação. Participaram deste estudo 32 estudantes do Ensino Médio de uma escola pública de tempo integral da região metropolitana de Recife-PE. A sequência didática contou com as seguintes etapas: avaliação diagnóstica, debate, pesquisa on-line, apresentação de vídeos, simulação computacional, *quiz* e resolução de um problema. Ao analisar a resolução final do problema proposto, verificou-se que o nível de conhecimento fenomenológico foi o que obteve mais soluções satisfatórias. Isso indica que os estudantes construíram conhecimentos importantes sobre as aplicações da radioatividade. O nível teórico de conhecimento, por ser o mais complexo e abstrato, não obteve soluções satisfatórias. Isso indica que os conhecimentos teóricos sobre radioatividade devem ser explorados com maior tempo, respeitando o tempo de aprendizagem dos estudantes. Apenas um grupo expressou o nível de conhecimento representacional e de forma parcialmente satisfatória. Isso pode estar ligado ao enunciado do problema proposto, que não destacou a representação como solução. Por fim, compreendemos que ao articular situações desafiadoras à realidade dos(as) estudantes com atividades investigativas, discussões colaborativas e exploração de múltiplas linguagens da Química, a sequência didática permitiu uma transformação gradual, mas consistente, dos níveis de compreensão científica dos(as) participantes desta pesquisa.

Palavras-chave: Ensino de química, fissão e fusão nuclear, sequência de ensino e aprendizagem, metodologia ativa.

ABSTRACT

Radioactive processes are a global reality, and much of society fears them because it lacks in-depth knowledge. Given this scenario, one of the functions of education is to bring knowledge to the population, aiming to develop critical and conscientious citizens who can participate in decision-making based on scientific knowledge and evidence. The general objective of this research is to analyze the contributions of the problem-solving teaching methodology to the learning of nuclear fission and fusion and its applications in a class of high school students. The radioactive processes of nuclear fission and fusion can be used for beneficial purposes or for the production of nuclear weapons. With these applications in mind, this study constructed and applied a problem-solving teaching sequence highlighting the theoretical, phenomenological, and representational levels of chemical knowledge. This investigation consists of qualitative, interventional, and applied research. Thirty-two high school students from a full-time public school in the metropolitan region of Recife, Pernambuco, participated in this study. The teaching sequence included the following stages: diagnostic assessment, discussion, online research, video presentation, computer simulation, quiz, and problem solving. Analyzing the final solution to the proposed problem, we found that the phenomenological level of knowledge yielded the most satisfactory solutions. This indicates that the students developed important knowledge about the applications of radioactivity. The theoretical level of knowledge, being the most complex and abstract, did not yield satisfactory solutions. This indicates that theoretical knowledge about radioactivity should be explored over a longer period of time, respecting the students' learning time. Only one group expressed the representational level of knowledge, and in a partially satisfactory manner. This may be linked to the problem statement, which did not emphasize representation as a solution. Finally, we understand that by articulating challenging situations to the students' realities with investigative activities, collaborative discussions, and exploration of multiple languages of chemistry, the teaching sequence enabled a gradual but consistent transformation in the participants' levels of scientific understanding.

Keywords: Chemistry teaching, nuclear fission and fusion, radioactivity, problem solving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ampola de Crookes.....	14
Figura 2 - Isótopos do Hidrogênio.....	19
Figura 3 - Experimento realizado por Pierre Curie.	20
Figura 4 - Emissão de radiações de um núcleo instável	21
Figura 5 - Comparação entre o poder de penetração das radiações.....	22
Figura 6 - Séries radioativas naturais	24
Figura 7 - Decaimento da amostra de céssio-137.....	26
Figura 8 - Atividade da Amostra de iodo-131.	26
Figura 9 - Fissão de um núcleo de urânio - 235	28
Figura 10 - Reação em cadeia.....	28
Figura 11 - Focos de Interesse da Química.....	39
Figura 12 - Níveis do Conhecimento Químico.....	40
Figura 13 - Problema com as características de um problema eficaz.....	46
Figura 14 - Relações epistêmica e pedagógica para uma sequência de ensino e aprendizagem.....	47
Figura 15 - Circunferência das relações epistêmicas e pedagógicas.	48
Figura 16 - Etapas da sequência de ensino e aprendizagem fundamentadas na resolução de problemas.	55
Figura 17 - Gráfico de respostas para o nível fenomenológico.....	67
Figura 18 - Respostas dos estudantes E.18, E.19 e E.24, respectivamente	68
Figura 19 - Gráfico de respostas para o nível teórico.....	69
Figura 20 - Resposta do estudante E.19.	69
Figura 21 - Gráfico de respostas para o nível representacional.....	70
Figura 22 - Imagem da resposta do estudante E.5.	71
Figura 23 - Resposta do grupo G.1 para a segunda etapa.	72
Figura 24 - Resposta do grupo G.1 para a segunda etapa.	74
Figura 25 - Resposta do grupo G.2 para a segunda etapa.	75
Figura 26 - Resposta do grupo G.3 para a segunda etapa.	75
Figura 27 - Resposta do grupo G.4 para a segunda etapa.	76
Figura 28 - Resposta do grupo G.5 para a segunda etapa.	76
Figura 29 - Imagem dos estudantes utilizado o simulador virtual NUKEMAP.	84
Figura 30 - Questões 1, 2 e 3 do quiz.....	86

Figura 31 - Questões 7, 8, 9 e 10 do quiz.....	87
Figura 32 - Questões 4 e 6 do quiz.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características inerentes à investigação científica.	50
Quadro 2 - Indicadores de um processo de resolução de problema para a disciplina de Química.	51
Quadro 3 - Problemas proposto para analisar os conhecimentos prévios dos estudantes.	56
Quadro 4 - Rubrica de avaliação para a avaliação diagnóstica.	57
Quadro 5 - Problema proposto baseado nas características de um problema eficaz.	59
Quadro 6 - Links para a pesquisa bibliográfica.	61
Quadro 7 - Rubricas de avaliação das etapas da sequência de ensino e aprendizagem.	63
Quadro 8 - Solução final do grupo G.1 para o problema proposto.	91
Quadro 9 - Solução final do grupo G.2 para o problema proposto.	92
Quadro 10 - Solução final do grupo G.3 para o problema proposto.	93
Quadro 11 - Solução final do grupo G.4 para o problema proposto.	94
Quadro 12 – Classificação das soluções dos grupos para o problema proposto.	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 ENSINO DE RADIOATIVIDADE	12
2.2 A HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE.....	14
2.3 RADIOATIVIDADE	17
2.4 PODER DE PENETRAÇÃO DAS RADIAÇÕES	22
2.5 ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA E TRANSMUTAÇÃO RADIOATIVA.....	22
2.6 TEMPO DE MEIA-VIDA	25
2.7 FISSÃO NUCLEAR	27
2.8 ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO	29
2.9 FUSÃO NUCLEAR	30
2.10 A BUSCA PELA FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA.....	30
2.11 BOMBAS NUCLEARES	31
2.12 A RADIOATIVIDADE NA BASE NACIONAL COMUM CURRICULAR E NO CURRÍCULO DE PERNAMBUCO PARA O ENSINO MÉDIO.....	33
2.13 CONSTRUÇÃO DO PENSAMENTO QUÍMICO	38
2.14 METODOLOGIA DE ENSINO POR RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS	43
2.15 A CONSTRUÇÃO DO PROBLEMA EFICAZ	45
2.16 SEQUÊNCIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM POR RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS	47
2.17 ENSINO ORIENTADO PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....	50
3 METODOLOGIA.....	52
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	53
3.2 CONTEXTO DA PESQUISA	53
3.3 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	54
3.4 ELABORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA	56

3.5 CONSTRUÇÃO DA SEQUÊNCIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM BASEADA NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS	58
Etapa 1. Avaliação Diagnóstica.....	58
Etapa 2. Discussões e reflexões dos estudantes para o problema.....	60
Etapa 3. Pesquisa bibliográfica	60
Etapa 4. Aula expositiva e apresentação de vídeos sobre radioatividade, suas aplicabilidades e os processos de fissão e fusão nuclear.	61
Etapa 5. Atividade com simuladores de processos de fissão e fusão nuclear	61
Etapa 6. Atividade lúdica para os estudantes	62
Etapa 7. Reapresentação do problema.....	62
3.6 AVALIAÇÃO DAS ETAPAS METODOLÓGICAS E DA SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA.....	62
3.7 PRODUTO EDUCACIONAL.....	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1. ETAPA 1 – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA	66
4.2. ANÁLISE DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA - ETAPAS 2 A 6	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE A - RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA	101
APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL	115

1 INTRODUÇÃO

Dentro da sala de aula, sempre nutri o desejo de desafiar as metodologias de ensino tradicionais. De maneira mais direta, muitas vezes observo esse ambiente como um lugar onde o professor assume o papel de detentor absoluto do conhecimento, sem abrir espaço para diálogos ou contestações. O ensino tradicional desenvolve ambiente que restringe os saberes e vivências dos estudantes, ao passo que, em contraste, o ensino construtivista possibilita um caminho para uma construção de aprendizagem mais eficaz e significativa (Pozo; Crespo, 2009).

Em conversas com docentes da área de Ensino de Química expressei o desejo de investigar metodologias de ensino que fossem mais dinâmicas e estimulassem os estudantes, algo que conseguisse incitar o pensamento crítico. Entre essas conversas fui orientado a pesquisar sobre a metodologia de ensino por resolução de problemas e após algumas leituras verifiquei que essa proposta didática, possibilitava espaço para meus anseios de professor inquieto e dinâmico.

Para Fernandes e Campos (2017):

A resolução de problemas no ensino de Química pode ser desenvolvida de forma criativa, explorando e relacionando os conteúdos químicos de forma integrada, contextualizada e interdisciplinar. Através da resolução de problemas é possível integrar vários conceitos químicos que envolvem simultaneamente os três objetos de estudo dessa disciplina (constituição, propriedades e transformações das substâncias e dos materiais) (Fernandes; Campos, 2017, p. 463).

É possível propor problemas que demandem soluções e mobilizem competências, habilidades e conhecimentos químicos. Isso ocorre quando os problemas englobam simultaneamente os três níveis do conhecimento químico: fenomenológico, teórico e representacional (Mortimer; Machado; Romanelli, 2000). Essa abordagem integrada é essencial para obter uma compreensão abrangente dos fenômenos químicos relacionados a substâncias e materiais (Fernandes; Campos, 2017).

A partir de uma meta-análise qualitativa das publicações nacionais sobre o ensino de radioatividade, Dias, Fernandes e Campos (2023) identificaram diversas lacunas na literatura, particularmente no que tange à formação de professores de Química e ao baixo número de artigos publicados em periódicos especializados na

área de Ensino. Para os autores, além da pandemia, essa queda também pode ser atribuída à política de desinvestimento em Ciência e Tecnologia dos últimos anos.

Espera-se que novos estudos venham a complementar os trabalhos já realizados, abrangendo outras linhas de pesquisa, diferentes níveis de ensino, e explorando novos objetos de conhecimento relacionados à radioatividade e suas aplicações científicas e tecnológicas (Dias; Fernandes; Campos, 2023).

O enfoque nas aplicações da radioatividade pode contextualizar esse objeto de conhecimento e ajudar nos processos de ensino e de aprendizagem. Para Silva (2013), a Química possibilita várias abordagens nas quais os conhecimentos científicos podem ser abordados de forma articulada com temas sociais, necessários a formação do cidadão, no enfoque de situações reais que facilitem sua ação sobre o mundo.

O presente trabalho abordou a radioatividade a partir das aplicações envolvendo os processos de fissão e fusão nuclear. Dessa forma, busca-se desmistificar o medo e motivar a compreensão dos fenômenos nucleares. Para Damasio e Tavares (2010) temas como medicina nuclear, usinas nucleares, alimentos irradiados, raios-x, são de difícil compreensão pela maior parte da população.

A utilização da metodologia de ensino por resolução de problemas (RP) promove a aprendizagem ao contextualizar e envolver os estudantes como protagonistas de seu próprio processo educacional. Essa metodologia de ensino, focada principalmente no estímulo ao pensamento crítico, capacita os estudantes a desenvolverem mecanismos para solucionar questões do dia a dia de forma ativa e participativa.

Na sequência de ensino e aprendizagem elaborada e aplicada, busca-se promover a compreensão da fissão e fusão nuclear no contexto da resolução de problemas globais e locais relacionados a esses objetos de conhecimento. Esta pesquisa alinha-se com as diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que destacam a Ciência e Tecnologia não apenas como ferramentas para solucionar problemas, mas também como uma abertura para novas perspectivas de mundo. (Brasil, 2018).

Diante desta perspectiva, avaliaremos como a metodologia de ensino por resolução de problemas contribui para a aprendizagem de conceitos e das aplicações relacionadas à fissão e fusão nuclear com estudantes do Ensino Médio. Nesse sentido, temos como objetivo geral:

Analisar as contribuições da metodologia de ensino por resolução de problemas para aprendizagem de fissão e fusão nuclear e suas aplicações em uma turma de estudantes do Ensino Médio.

E como objetivos específicos:

- Identificar os conhecimentos prévios dos estudantes do 3º ano do Ensino médio sobre conceitos e aplicações da fissão e fusão nuclear.
- Elaborar uma sequência de ensino e aprendizagem pautada na metodologia de ensino por resolução de problemas para abordagem da temática fissão e fusão nuclear.
- Avaliar as contribuições da metodologia de ensino por resolução de problemas para o desempenho dos estudantes em relação à fissão e fusão nuclear.
- Elaborar um produto educacional sobre a sequência de ensino e aprendizagem baseado na metodologia de ensino por resolução de problemas relacionado a temática fissão e fusão nuclear em formato de e-book.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENSINO DE RADIOATIVIDADE

Ainda existe medo por parte da sociedade quando se fala sobre radioatividade. Segundo Damasio e Tavares (2010), para um cidadão sem formação científica, ou mesmo em alguns casos com ela, algumas palavras acompanhadas de “nuclear” ou “radioativo” podem causar temor e até pânico.

Para Cecelotti e Marques (2023), os processos radioativos encontram ampla aplicação em diversas áreas, como medicina, agricultura, indústria e geração de energia elétrica.

Os fenômenos radioativos têm se tornado cada vez mais presentes nos meios de comunicação e nas redes sociais, tornando essencial que o professor de química adote novas estratégias de ensino ao tratar desse objeto de conhecimento em sala de aula (Cecelotti; Marques, 2023).

Sem um entendimento científico sobre radioatividade, a população tende a aceitar as informações e conceitos transmitidos pelos meios de comunicação, sendo estes um dos principais canais de acesso à informação. Ao analisar a abordagem da radioatividade sob a ótica do jornalismo científico, Lopes *et al.*, (2024) apontam que os conceitos apresentados nas matérias muitas vezes são equivocados ou superficiais:

A visão negativa acerca da temática somada à limitação científica dos conceitos envolvidos pode contribuir de forma negativa para o exercício da cidadania, já que o público sendo bombardeado apenas com uma versão simplista e deformada da temática é alienado das informações necessárias para uma participação ativa na sociedade. (Lopes *et al.*, 2024, p. 20).

Contudo, mesmo com tanto medo e aversão é importante ressaltar que a radioatividade, dependendo da forma como é utilizada, não só pode causar desastres, mas também, trazer benefícios para a sociedade. As aplicações tecnológicas com fontes radioativas propostas para o benefício dos indivíduos têm se expandido ao longo dos anos, assim como a preocupação sobre as consequências e repercussões advindas do seu uso (Brito, 2019).

Para Damasio e Tavares (2010) a radioatividade pode ser muito benéfica para a medicina, tanto em exames como em terapias e fontes de energia para aparelhos,

como é o caso do marca-passo artificial, que utiliza a energia liberada pelo plutônio-238 ao decair em urânio-234.

O benefício da radioterapia vem da aplicação da radioatividade, um exemplo é a utilização do iodo-131 para tratar problemas relacionados à tireoide (Damasio; Tavares, 2010).

A humanidade vem enfrentando um grande problema que é a aceleração do aquecimento global, que se dá através da queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, que liberam gás carbônico. O uso da energia nuclear, associada a outras fontes de energia renováveis, pode ser uma alternativa para minimizar o rápido aumento da temperatura da Terra.

A geração de energia através de usinas nucleares não queima combustível fóssil e não gera CO₂, por isso, muitos ambientalistas acreditam que a energia nuclear é uma grande aliada como fonte energética menos agressiva ao meio ambiente. Para Merçon e Quadrat (2004) as usinas nucleares surgiram como uma fonte poderosa para atender às demandas de energia, pois não requeriam características geográficas e não utilizavam combustíveis fósseis ou poluíam a atmosfera.

Para Silva, Campos e Almeida (2013), o estudo da radioatividade não é apenas crucial para a compreensão da estrutura do átomo, mas também abrange questões contemporâneas da sociedade. Essa temática desempenha um papel fundamental no ensino de Ciências, com ênfase notável nas disciplinas de Física e Química, integrando-se de maneira relevante às preocupações atuais da sociedade com os riscos das aplicações da radioatividade.

É compreensível que a vasta quantidade de informações sobre radioatividade possa gerar medo, mas uma maneira de mudar o senso comum é promover ações educativas que desmistifiquem alguns conceitos (Araújo *et al.*, 2018). Para isso, é necessário que os estudantes sejam informados sobre os pontos positivos e negativos das aplicações da radioatividade. Esse esclarecimento pode começar nas aulas de Química, com atividades que proporcionem conhecimento e aprendizagem sobre o tema, que faz parte do conteúdo programático desse componente curricular.

Assim, para Araújo *et al.*, (2018), uma proposta para promover mudanças envolve adotar práticas de ensino inovadoras, isso permite que o educador utilize novas ferramentas, proporcionando ao aluno uma aprendizagem significativa. É essencial desenvolver projetos educativos que promovam a interação entre alunos e, alunos e professores. Isso facilita o compartilhamento de conhecimentos em

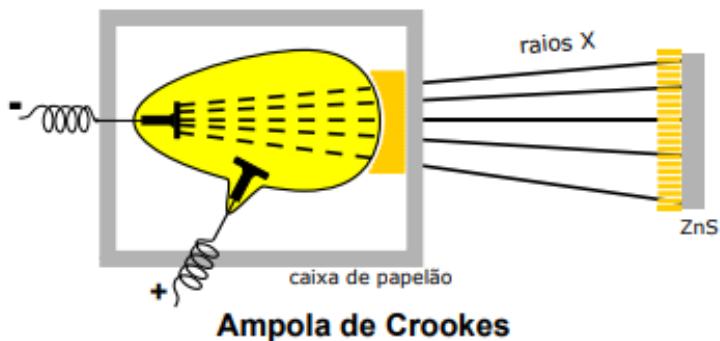
atividades de Química, como aulas expositivas, demonstrativas, excursões, práticas e projetos, utilizando a metodologia de projetos para enriquecer o aprendizado dos estudantes (Araújo *et al.*, 2018).

2.2 A HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE

De acordo com Damasio e Tavares (2010), o termo "radioatividade" surgiu após, na França, Marie Curie (1867-1934) refazer o experimento realizado por Bequerel, utilizando um cristal composto de sulfato de potássio e urânio, onde ela registrou em seu diário a radiação nuclear emitida pelo urânio. No entanto, os estudos sobre radioatividade começaram com as observações da radiação emanada pelos tubos de raios catódicos, realizados pelo físico alemão Wilhelm Roentgen (1845-1923), que descobriu os raios-x (Cecelotti; Marques, 2023). De acordo com Martins (1990), a descoberta consistiu em, ao passar uma descarga elétrica de alta tensão por um tubo de vidro com pressão muito baixa, ocorre uma luminosidade e aparecem os "raios catódicos", hoje entendidos como fluxo de elétrons.

A popularidade de sua descoberta deve-se, em parte, à observação de ossos através das primeiras radiografias (Martins, 1990). Para Cardoso (2012), Roentgen observou a saída de raios misteriosos da ampola de Crookes, que seriam capazes de atravessar folhas de papelão:

Figura 1 - Ampola de Crookes.



Fonte: (Cardoso, 2012, p. 48).

Logo depois, em 1896, o físico francês Henry Becquerel (1852-1908), inspirado pelas descobertas de Roentgen, conduziu experimentos com filme fotográfico e sais de urânio, observando que mesmo sem qualquer fonte de energia externa, o sal de

urânio emitia radiação capaz de excitar as chapas fotográficas (Damasio; Tavares, 2010). Entre outros assuntos, ele estudou a fosforescência invisível (no infravermelho) de várias substâncias. Estudou, em particular, os espectros de fluorescência de sais de urânio, utilizando amostras que seu pai havia acumulado ao longo dos anos (Martins, 1990).

Para Okuno (2018), Becquerel descobriu que os raios emitidos pelo sal de urânio apresentavam uma grande similaridade com os raios-x recentemente descobertos por Roentgen, pois, assim como estes, também produziam descarga de corpos eletrificados. Ainda segundo Okuno (2018), Becquerel interessou-se pelo assunto porque tanto seu pai quanto seu avô, assim como ele próprio, haviam trabalhado com materiais fosforescentes. Assim, ele focou sua pesquisa na investigação de possíveis propriedades em seus materiais que pudessem estar relacionadas à descoberta de Roentgen. Os trabalhos de Becquerel não estabeleceram, nem a relação da natureza da radiação emitida pelo urânio, nem a natureza subatômica do processo. Assim, de acordo com Cecelotti e Marques (2023), após suas experiências explorando a emissão dos raios-x por corpos luminescentes, Becquerel interrompeu suas pesquisas.

No início de 1898, dois pesquisadores, independentemente, tiveram a ideia de tentar localizar outros materiais, diferentes do urânio, que emitissem radiações do mesmo tipo. A busca foi feita, na Alemanha, por G. C. Schmidt e, na França, por Marie Curie (Martins, 1990). Marie Curie concebeu a hipótese de que o fenômeno observado não era exclusivo do urânio, acreditando que outros materiais também poderiam possuir a mesma propriedade. Com isso, a direção da pesquisa foi alterada, e ela começou a buscar sistematicamente outros materiais que emitissem os "raios de Becquerel". De fato, logo a seguir, ela descobriu que o tório também emitia espontaneamente radiação semelhante à emitida pelo urânio e com intensidade análoga, comprovando sua previsão (Okuno, 2018). Segundo Martins (1990), através de processos de cristalização fracionada foi possível obter um material (ainda unido ao bismuto) que era 400 vezes mais ativo do que o urânio puro. De posse dessas evidências, Marie e Pierre Curie publicaram os primeiros trabalhos:

Cremos, portanto, que a substância que retiramos da pechblenda, contém um metal ainda não identificado, vizinho ao bismuto por suas propriedades analíticas. Se a existência desse novo metal for confirmada, propomos dar-lhe o nome de polônio, nome do país de origem de um de nós. (Curie; Curie, 1898 apud Martins, 1990, p. 40).

Em 1898, os Curie apresentaram à Academia de Ciências um trabalho no qual evidenciaram um novo elemento radioativo 900 vezes mais reativo que o urânio, e por parecer mais reativo que qualquer outro elemento, recebeu o nome de rádio (Ra).

Para Okuno (2018), em 1898, Ernest Rutherford foi para Montreal, no Canadá, para ocupar uma vaga na *McGill University*, onde iniciou os estudos buscando desvendar a natureza dos “raios de Becquerel”. Após um ano de estudos, reportou a existência dos raios alfa e beta na radiação emitida pelo urânio, sendo um deles facilmente absorvido, e o outro, muito mais penetrante, e ambos desviados por campo magnético, só que em direções opostas. Um ano mais tarde, Paul Villard (1860-1934) identificou um tipo de radiação emitida pelo urânio, que recebeu o nome de radiação gama e, ao contrário das partículas alfa e beta, não sofria deflexão em campos magnéticos (Okuno, 2018).

Em 1910, Rutherford propôs a Hans Wilhelm Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), a realização de um experimento sobre o espalhamento, através de uma fina folha de ouro, de partículas alfa emitidas pelos núcleos do polônio (Okuno, 2018). O propósito desse experimento era observar qual dos dois modelos de átomo – o modelo de J. J. Thomson ou o modelo saturniano de Hantaro Nagaoka (1865-1950) – melhor descrevia um átomo (Okuno, 2018). Os resultados corroboraram com o modelo de Nagaoka e levaram Rutherford a sugerir que quase toda a massa do átomo neutro está concentrada em seu pequeno núcleo, que é carregado positivamente e circundado por elétrons negativos que orbitam ao seu redor.

Para Okuno (2018) até 1934, as radiações utilizadas na Medicina eram os raios-x, assim como as emissões alfa, beta e a radiação gama, emitidas por radioisótopos naturais. Logo, em 1934, Irène Curie, filha de Marie Curie, e seu marido, Frédéric Joliot-Curie, pela primeira vez produziram artificialmente os radioisótopos fósforo-30 e nitrogênio-13, bombardeando alumínio e boro, com partículas alfa emitidas pelo polônio. Isto é, eles conseguiram transmutar elementos comuns que não eram radioativos em elementos radioativos (Okuno, 2018).

Dentro da historicidade da radioatividade, destaca-se o trecho do trabalho do físico italiano Orso Mario Corbino (1876-1937), de 1929, professor do Instituto de Física da Universidade de Roma, apoiado nas ideias de Enrico Fermi:

O único caminho para permitir a agressão do núcleo do átomo é aquela que permite a aceleração artificial dos projéteis naturais dos elementos radioativos em grande número e com grande velocidade, o que exigirá tubos carregados e alimentados a uma diferença de potencial de dez milhões de volts. Somente dificuldades técnicas e financeiras, não a priori insuperáveis, se opõem a realização deste grande projeto. O objetivo não é somente a transmutação dos elementos químicos em quantidades sensíveis, mas a constatação de grande quantidade energética que deverá se manifestar na pulverização ou reconstrução dos núcleos atômicos. (Corbino, 1929, apud CNEN s.d., p.13).

Desde então, diversos tipos de radionuclídeos têm sido gerados através do bombardeamento de elementos não radioativos com partículas produzidas e aceleradas por máquinas. Entre essas máquinas, destacam-se o ciclotron, criado a partir de 1930 por Ernest Orland Lawrence (1901-1958) e Milton Stanley Livingston (1905-1986), e o reator de fissão, desenvolvido por Enrico Fermi (1901-1954) durante a Segunda Guerra Mundial (Okuno, 2018).

Por fim, para Cecelotti e Marques (2023), a descoberta da radioatividade representa não apenas uma das maiores conquistas da humanidade, mas também foi explorada para propósito tanto catastrófico quanto bélico.

2.3 RADIOATIVIDADE

A palavra radioatividade, criada por Marie Curie, deriva do termo radiação, segundo Okuno (2018, p 29):

Radiação é uma forma de energia em trânsito, da mesma forma que calor é energia térmica em trânsito (Okuno; Yoshimura, 2010). É emitida por uma fonte e se propaga em qualquer meio, de um ponto a outro, sob a forma de partícula com ou sem carga elétrica, ou ainda sob a forma de onda eletromagnética.

Para Cardoso (2012, p. 16), radiação “É a propagação de energia na forma de ondas eletromagnéticas ou partículas”. Ainda segundo o autor, radiação ionizante é “qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria,

"arranca" elétrons dos átomos ou de moléculas, transformando-os em íons, direta ou indiretamente (Cardoso, 2012, p.17).

Para Cecelotti e Marques (2023), a radioatividade é caracterizada pelo fenômeno no qual os núcleos atômicos emitem radiações devido a transformação intrínseca em sua estrutura, podendo ou não resultar na formação de novos elementos químicos.

Os átomos dos elementos químicos são constituídos basicamente, por três partículas subatômicas: os prótons - carga elétrica positiva, os nêutrons - sem carga elétrica e os elétrons com carga negativa. Os prótons e nêutrons estão localizados no núcleo do átomo, onde está concentrada a significativa massa do átomo, já que os elétrons se localizam ao redor do núcleo, tendo uma massa muito menor que os prótons e os nêutrons.

A identificação do número atômico (Z) de um elemento é determinada pela quantidade de prótons presentes, sendo exclusiva para cada elemento. Juntamente com os prótons, os nêutrons no núcleo são responsáveis por estabelecer o número de massa dos elementos químicos. Portanto, ao somar o número de prótons e nêutrons de um elemento químico, podemos determinar sua massa.

Adicionalmente, a quantidade de nêutrons pode variar dentro de um núcleo, resultando na existência de elementos químicos com o mesmo número atômico, mas diferentes massas - conhecidos como isótopos. Por exemplo, na natureza encontramos três isótopos do urânio: U-234 em quantidades mínimas; U-235 representando cerca de 0,7%; e U-238 majoritariamente presente com 99,3% (Cardoso, 2012, p.11). A ilustração abaixo mostra os isótopos do hidrogênio:

Figura 2 - Isótopos do Hidrogênio.



Fonte: (Cardoso, 2012, p.11).

Segundo Martins (1990), a radioatividade é um fenômeno em que os núcleos dos átomos passam por transformações, emitindo radiação e, às vezes, formando novos elementos químicos. Podemos pensar nos núcleos pequenos como sendo estáveis, enquanto os núcleos grandes tendem a ser instáveis, devido, entre outros fatores, à repulsão entre os prótons.

De acordo com Damásio e Tavares (2010), a origem da radioatividade está relacionada com a predominância da força eletromagnética sobre a força nuclear forte. A força eletromagnética é responsável pela atração ou repulsão entre corpos, como quando partículas com cargas iguais se repelem e partículas com cargas opostas se atraem. Já a força nuclear forte é sempre atrativa e mantém os prótons unidos no núcleo, superando a repulsão entre as cargas positivas dos prótons.

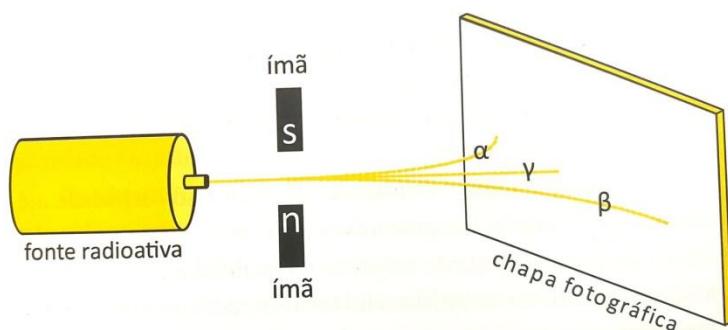
Quando a força nuclear forte predomina sobre a força eletromagnética, os prótons, apesar de sua carga positiva e da tendência natural de se repelirem, permanecem unidos no núcleo. Essa coesão entre os prótons garante a estabilidade do núcleo atômico. No entanto, se a força eletromagnética, que provoca a repulsão entre as cargas positivas dos prótons, superar a força nuclear forte, o núcleo se tornará instável, o que pode resultar na emissão de radiação para tentar alcançar um novo estado de equilíbrio. É esse desequilíbrio entre as forças que dá origem à radioatividade, à medida que o núcleo busca reconfigurar suas interações internas para recuperar estabilidade.

Segundo Damasio e Tavares (2010):

Todos os elementos com número atômico maior que 80 possuem isótopos radioativos e todos os isótopos dos elementos com número atômico maior que 82 são radioativos. Mesmo elementos com números atômicos pequenos, como o carbono (C), podem ter isótopos radioativos, como o caso do carbono-14. (Damasio; Tavares, 2010, p.25).

Através de um arranjo experimental (Figura 3), utilizando uma fonte radioativa, ímãs e uma chapa fotográfica, Pierre Curie observou que as emissões nucleares se dividiam de três formas diferentes que posteriormente seriam conhecidas como alfa α (positiva), beta β (negativa) e gama γ (neutra).

Figura 3 - Experimento realizado por Pierre Curie.

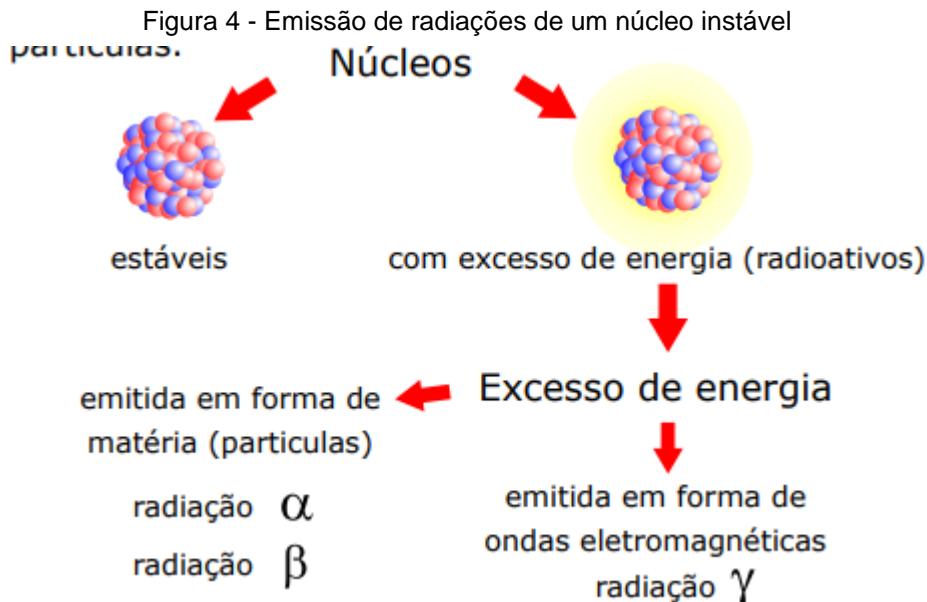


Fonte: Damasio e Tavares (2010).

Os elementos que emitem radioatividade passam por um processo peculiar em busca de estabilidade, emitindo partículas alfa, beta e radiações gama. Esse fenômeno visa atingir um estado de equilíbrio interno. Assim, sempre que um núcleo instável emite radiação, ocorre uma tentativa de alcançar um estado mais estável. (Damasio; Tavares, 2010).

É importante destacar que as radiações nucleares podem ocorrer de duas formas: por emissão de partículas ou por ondas eletromagnéticas. As partículas têm massa e carga elétrica, enquanto as ondas eletromagnéticas não têm nem massa nem carga. Assim, a radioatividade envolve a emissão de diferentes tipos de partículas e radiações, cada uma com características específicas, incluindo suas velocidades. As partículas alfa, possuem uma velocidade relativamente baixa, correspondendo a cerca de 5% da velocidade da luz. Em contraste, as partículas beta atingem velocidades significativamente maiores, próximas a 95% da velocidade da luz. Já a radiação gama propaga-se à velocidade da luz, que é de 3×10^8 m/s (Okuno, 2018).

A Figura 4 descreve o processo de busca pela estabilidade de um núcleo com excesso de energia, ou seja, instável:



Fonte: (Cardoso, 2012, p. 15)

Uma forma pela qual os núcleos instáveis podem alcançar estabilidade é por meio da emissão de partículas alfa. As partículas alfa são núcleos dos átomos de hélio constituídos de dois prótons e dois nêutrons. A principal fonte dessas partículas são os núcleos de elementos pesados, como urânio, tório, polônio e rádio, que as emitem espontaneamente na desintegração nuclear, com energia de alguns milhões de elétrons-volt (MeV) (Okuno, 2018).

Outra característica dos núcleos instáveis é a emissão de partículas beta. As partículas beta, assim chamadas por sua origem nuclear, também são emitidas espontaneamente por radionuclídeos. As partículas beta (β^-) correspondem a elétrons, enquanto as beta mais (β^+) são pósitrons, partículas idênticas aos elétrons, mas com carga elétrica positiva (Okuno, 2018).

Durante a emissão de uma partícula beta, um nêutron excedente se transforma em um próton, que permanece no núcleo, enquanto um elétron (emitido como partícula beta) e um neutrino (uma partícula sem carga elétrica e praticamente sem massa) são liberados.

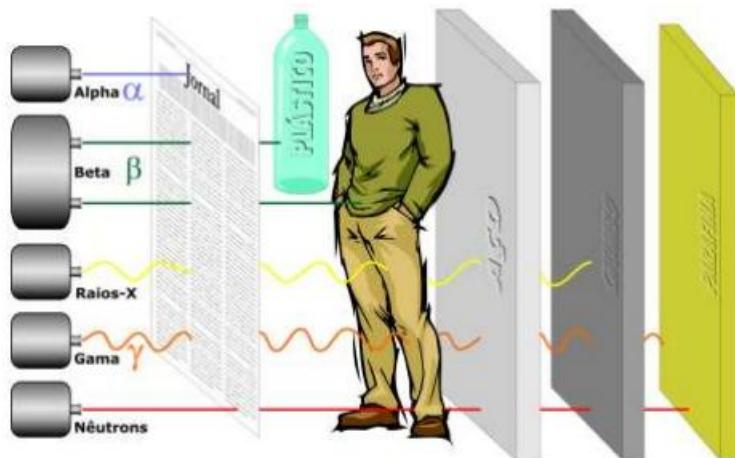
Mesmo depois de emitir as partículas alfa e beta, o núcleo ainda pode ter um excesso de energia. Para se estabilizar completamente, ele emite ondas eletromagnéticas semelhantes à luz, chamadas de raios gama.

2.4 PODER DE PENETRAÇÃO DAS RADIAÇÕES

O poder de penetração das três radiações (alfa, beta e gama) é diferente e está diretamente relacionado às suas massas. As partículas alfa são bloqueadas por uma folha de papel, enquanto que para bloquear a radiação beta é necessário uma chapa de alumínio, plástico ou o próprio corpo humano. No entanto, para bloquear as emissões gama é preciso um bloco de chumbo

Os raios-x e gama têm alto poder de penetração, que aumenta com a energia, podendo atravessar o corpo humano. Materiais densos como chumbo, concreto, aço e terra compactada são utilizados para blindagem (Okuno, 2018)

Figura 5 - Comparação entre o poder de penetração das radiações



Fonte: (Cardoso, 2012, p. 23).

Contudo, é importante ressaltar que o poder ionizante das emissões alfa, beta e gama são inversamente proporcionais ao poder de penetração.

2.5 ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA E TRANSMUTAÇÃO RADIOATIVA

Cardoso (2012) afirma que é impossível prever o momento em que um núcleo irá emitir radiação; elas ocorrem de forma imprevisível. No entanto, para cada segundo, há um certo número esperado de emissões ou transmutações. Essa taxa de transformação por segundo é chamada de atividade da amostra.

As unidades de medida da atividade de uma amostra radioativa são expressas em Bq (Becquerel), correspondente a uma desintegração por segundo, e em Ci (Curie), equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

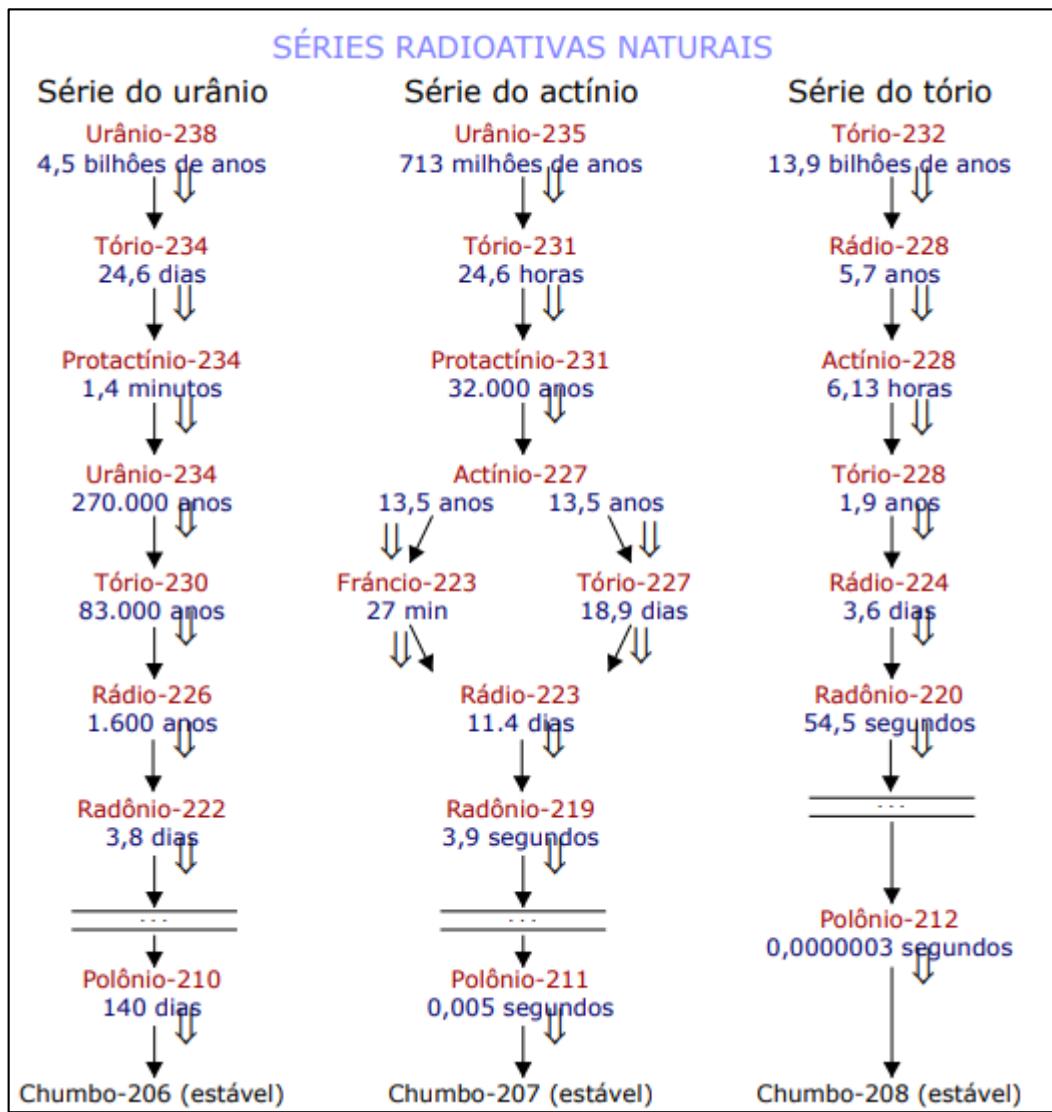
Na desintegração de um átomo, seu núcleo emite radiação até se transformar em outro núcleo mais estável (Damasio; Tavares, 2010). Quando um átomo de um elemento radioativo sofre transmutação, ele se transforma em outro átomo. Se esse novo átomo ainda for radioativo, ele também passará por transmutação, repetindo o processo até se tornar um átomo estável. Dessa forma, quando um átomo de núcleo instável emite radiação, está em processo de decaimento radioativo, o que significa que emitirá radiação até se tornar um núcleo estável.

Para Okuno (2018), a radiação corpuscular é constituída de um feixe energético de partículas como elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons, partículas alfa etc., e afirma que:

As partículas alfa, os elétrons e os pósitrons – são emitidas espontaneamente de radionuclídeos, que são núcleos atômicos com excesso de energia, em busca de maior estabilidade energética. Esse fenômeno é conhecido como desintegração ou decaimento nuclear, e, como resultado de tal emissão, o radionuclídeo se transmuta em outro elemento químico. O primeiro elemento, aquele que emite radiação, é chamado de pai, e o segundo, de filho. Se o elemento filho ainda não tiver alcançado a estabilidade energética, ele também se desintegrará e assim por diante, até se transformar em um elemento estável. É isso que acontece com as séries naturais dos decaimentos sucessivos que começam com urâno e tório e terminam em chumbo. O decaimento nuclear ou desintegração nuclear obedece a uma diminuição exponencial do elemento pai de uma amostra com o tempo. (Okuno, 2018, p. 11).

Dessa forma, uma sequência de decaimento radioativo é chamada de série radioativa ou família radioativa natural. De acordo com Damasio e Tavares (2010), existem três séries radioativas: do urâno (U), do actínio (Ac) e do tório (Th). As três séries terminam em isótopos de chumbo (Pb): chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208, respectivamente (Figura 6).

Figura 6 - Séries radioativas naturais



Fonte: (Cardoso, 2012, p.22).

Os aceleradores de partículas e reatores nucleares possibilitaram a fabricação de elementos artificiais muito instáveis, de acordo com Damasio e Tavares (2010):

Um exemplo desse tipo de elemento é o plutônio (Pu), que tem número atômico 94. Este elemento artificial é usado em bombas atômicas, como a que, em 1945, foi jogada sobre a cidade japonesa de Nagasaki pelos Estados Unidos da América. Como são instáveis, esses elementos artificiais decaem sucessivamente até alcançar a estabilidade. Este decaimento é conhecido como séries radioativas artificiais. (Damasio; Tavares, 2010, p.39).

Os radioisótopos artificiais têm grande importância científica e tecnológicas, pois a partir deles podem ser sintetizados radiofármacos e novos elementos químicos.

2.6 TEMPO DE MEIA-VIDA

O tempo ou período de meia-vida de um radioisótopo refere-se ao intervalo temporal decorrido quando uma amostra de um radionuclídeo se reduz à metade. A outra metade transformou-se em átomos estáveis:

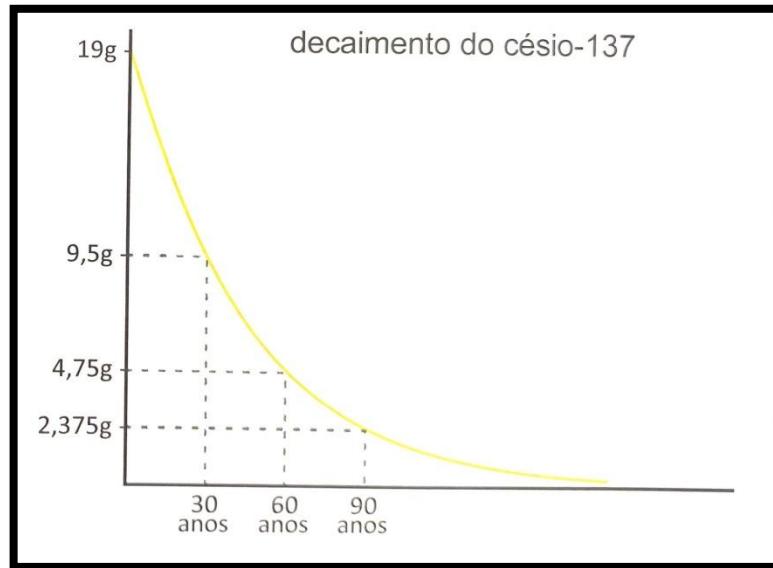
Nunca se sabe quando um determinado núcleo se desintegrará. Entretanto, caso se tenha uma amostra com um número muito grande de radionuclídeos, sabe-se que, após um intervalo de tempo chamado de meia-vida, metade dos núcleos atômicos da amostra radioativa terá se desintegrado (Okuno, 2018, p. 31).

É impossível prever o momento exato em que cada isótopo radioativo irá decair, pois as desintegrações não ocorrem simultaneamente; são eventos variáveis, já que as transmutações acontecem de forma aleatória entre os isótopos radioativos. Algumas dessas transmutações podem levar muito tempo, enquanto outras têm uma vida bastante curta. O que pode ser previsto é o tempo necessário para que metade dos átomos de uma determinada amostra radioativa se transforme em outro isótopo mais estável. Esse período é conhecido como meia-vida, termo proposto por Rutherford.

Em 1987, um trágico acidente ocorrido em Goiânia marcou o Brasil com o maior desastre radiológico já registrado em área urbana. Dois catadores de metal encontraram e venderam para o dono de um ferro velho uma cápsula contendo 19g de césio-137, um pó azul e brilhante, visível principalmente no escuro. Este material havia sido retirado de uma clínica de radioterapia desativada, que não seguiu as normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) para a retirada do material radioativo, e que servia de abrigo para moradores de rua. Este acidente resultou na morte de quatro pessoas e contaminou muitas outras (Okuno, 2018).

A Figura 7 apresenta o decaimento radioativo do césio-137:

Figura 7 - Decaimento da amostra de césio-137.

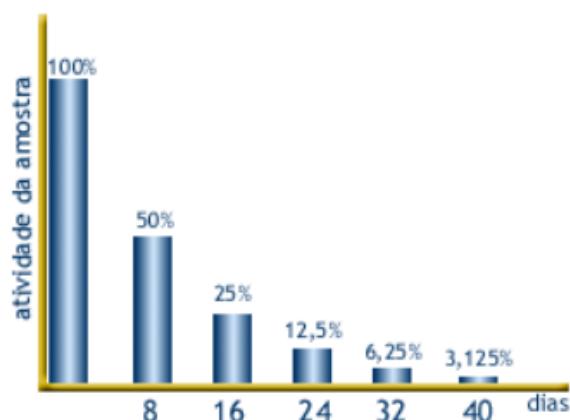


Fonte: Damasio e Tavares (2010, p. 43).

De acordo com Damásio e Tavares (2010), o tempo de meia-vida do césio-137 é de 30 anos, o que significa que apenas em 2017 metade do césio-137 original havia se degradado, ou seja, 9,5g.

O iodo-131, devido ao seu baixo tempo de meia-vida, que é de apenas 8 dias, é amplamente utilizado na medicina nuclear, especialmente em exames de tireoide. Essa propriedade permite que um paciente que tenha ingerido iodo-131 possa ser liberado após algumas horas sem representar riscos significativos para si mesmo ou para as pessoas próximas. Isso se deve ao fato de que nosso organismo elimina muitas das substâncias ingeridas através das fezes, urina e suor (Cardoso, 2012).

Figura 8 - Atividade da Amostra de iodo-131.
Fonte: (Cardoso, 2012, p. 20).



À medida que as meias-vidas se passam o material radioativo diminui sua atividade radioativa. Por fim, Okuno (2018) afirma que a meia-vida biológica é o tempo necessário para eliminar metade dos átomos ingeridos ou inalados e não depende da radioatividade. Assim, todos os radioisótopos de iodo são metabolizados pelo organismo da mesma maneira que o iodo-127, o mais estável e não radioativo.

2.7 FISSÃO NUCLEAR

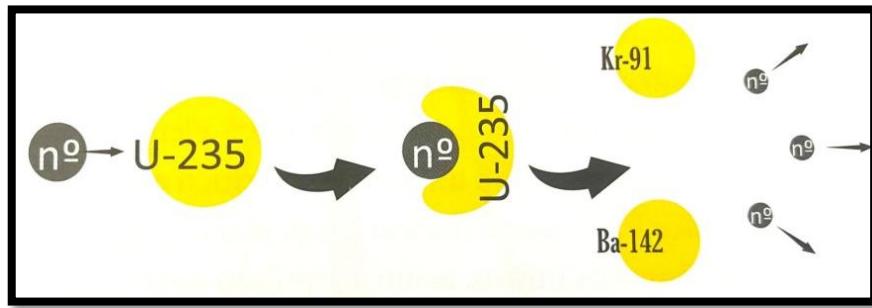
O termo fissão tem o significado de ruptura, quebra, cisão, partição, divisão. Por sua vez, a expressão fissão nuclear, diz respeito à divisão, quebra, cisão do núcleo atômico. Essa expressão foi escolhida em analogia ao processo de divisão celular, também chamado de fissão celular. A fissão nuclear é definida como “Uma reação em cadeia em que núcleos grandes e instáveis são quebrados por projéteis – como o nêutron – produzindo núcleos menores e uma grande quantidade de energia” (Passos; Souza, 2012, p. 83).

Durante a fissão nuclear, um nêutron é utilizado para bombardear o núcleo atômico, o qual se divide em dois núcleos menores e emite nêutrons. Esses nêutrons podem, por sua vez, provocar a fissão de outros núcleos, gerando uma reação em cadeia.

Segundo Damasio e Tavares (2010), esse bombardeamento causa um alongamento do núcleo, resultando em um afastamento dos prótons uns dos outros. Esse afastamento reduz a força nuclear forte, que mantém os prótons unidos, e faz com que a força eletromagnética, que tem alcance maior, passe a dominar a interação entre as partículas nucleares. Esse domínio da força eletromagnética é o que desencadeia a divisão do núcleo atômico em partes menores durante a fissão nuclear.

Damasio e Tavares (2010) destacam na Figura 9 o núcleo de urânio sendo bombardeado com um nêutron e, após a fissão, ejetando três nêutrons.

Figura 9 - Fissão de um núcleo de urânio - 235

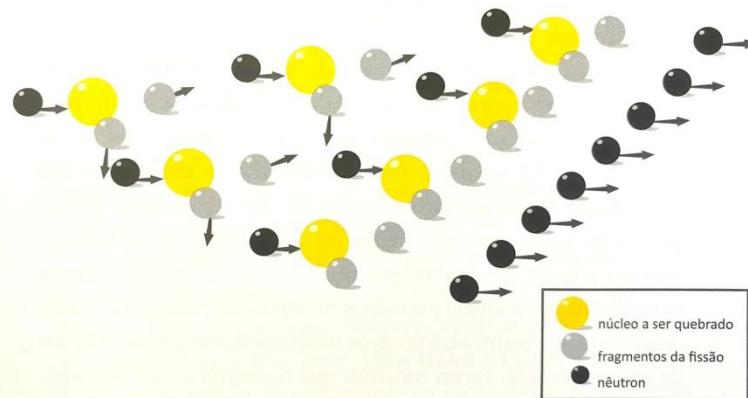


Fonte: Damasio e Tavares (2010, p. 70).

De acordo com Damasio e Tavares (2010), um único nêutron pode fissionar vários núcleos, pois, em média, cada núcleo quebrado libera mais nêutrons do que aqueles que foram inicialmente inseridos no sistema reacional.

Tavares (2019) explica que, se uma reação em cadeia (Figura 10) não for controlada, poderia resultar em uma explosão de grande magnitude, semelhante a uma bomba com alto poder de destruição. No entanto, ao ser adequadamente controlada, essa reação pode gerar energia utilizável, como ocorre nas usinas nucleares que produzem eletricidade atualmente.

Figura 10 - Reação em cadeia.



Fonte: Damasio e Tavares (2010).

Assim sendo, a reação em cadeia não cessa até que todo o combustível físsil seja consumido. Para controlar esse processo, é essencial regular o fluxo de nêutrons, já que a reação depende da presença dessas partículas. Como mencionado por Damasio e Tavares (2010), o boro, na forma de ácido bórico, e o cádmio, na forma de barras metálicas, são capazes de absorver os nêutrons. Quando isso ocorre, são formados isótopos mais estáveis desses elementos.

Essas barras de controle, também conhecidas como barras de segurança, utilizadas nos reatores das usinas nucleares, podem ser abaixadas para reduzir ou interromper as reações nucleares, ou elevadas para acelerar o processo (Damasio; Tavares, 2010). O controle preciso dessas barras é crucial para garantir a segurança e a eficiência dos reatores nucleares.

2.8 ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO

Cardoso (2012) destaca que, em uma amostra de 1000 átomos de urânio encontrados na natureza, apenas 7 são de urânio-235, enquanto os outros 993 são de urânio-238. Essa disparidade nas proporções de isótopos é crucial, uma vez que o urânio-238, mesmo capaz de absorver nêutrons, não é adequado para sustentar uma reação em cadeia de fissão nuclear.

O tempo de meia-vida dos isótopos de urânio influencia diretamente sua disponibilidade. O urânio-238 possui um tempo de meia-vida de 4,5 bilhões de anos, enquanto o urânio-235 possui um tempo de meia-vida de 713 milhões de anos. Essa diferença explica por que o urânio-235 é mais raro na crosta terrestre.

Tanto para usinas nucleares quanto para a produção de armamentos bélicos, é essencial modificar as proporções dos isótopos de urânio. Nas usinas nucleares, a proporção ideal é de 4% de urânio-235 e 96% de urânio-238, enquanto para armamentos bélicos, essa proporção varia para 20% de urânio-235 e 80% de urânio-238. Essa modificação é necessária para garantir a eficiência e a segurança desses processos (Cardoso, 2012). O processo de modificação das proporções dos isótopos de urânio, que visa a reação em cadeia é conhecido como enriquecimento de urânio e podem acontecer de duas formas: a difusão gasosa e a centrifugação (Damasio; Tavares, 2010).

Na técnica de difusão gasosa, o enriquecimento de urânio é realizado utilizando o gás de hexafluoreto de urânio e uma membrana porosa. No entanto, o enriquecimento obtido é relativamente baixo e o processo necessita ser repetido várias vezes para alcançar as proporções desejadas. Estima-se que, para atingir a proporção utilizada nas usinas nucleares, o processo precisa ser repetido cerca de 1.200 vezes.

Já na centrifugação, o processo ocorre em uma centrífuga, onde o gás hexafluoreto de urânio é colocado para girar em alta velocidade. Esse movimento de

rotação faz com que os isótopos se distribuam de forma diferenciada, permitindo o enriquecimento desejado.

2.9 FUSÃO NUCLEAR

O processo de fusão nuclear ocorre quando átomos menores se combinam para formar átomos maiores. Um exemplo significativo desse processo é observado no sol, onde átomos de hidrogênio se fundem para formar núcleos de hélio. Nesse processo, a diferença de massa entre os átomos originais e os produtos da fusão é convertida em energia, conforme expresso pela famosa equação de Einstein, $E=mc^2$ (Damasio; Tavares, 2010).

Comparativamente, o processo de conversão de massa em energia da fusão nuclear é significativamente maior que o da fissão nuclear, representando cerca de 0,7% e 0,1% da massa convertida em energia, respectivamente. Essa diferença evidencia o potencial energético da fusão nuclear em relação à fissão.

O processo de fusão nuclear foi demonstrado por Rutherford em 1930. Segundo Damasio e Tavares (2010):

O experimento de Rutherford consistia em lançar núcleos de átomos de hidrogênio pesado, conhecidos hoje com deutério, contra uma lâmina de lítio (Li). Após a colisão, os dois se fundiam e o produto da fusão se partia em dois átomos de hélio, se movendo em direções opostas a uma grande velocidade. Rutherford repetiu a experiência agora fazendo chocarem-se dois átomos de deutério, que também se fundiam. Na fusão nuclear são liberadas grandes quantidades de energia (Damasio; Tavares, 2010, p. 88).

2.10 A BUSCA PELA FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA

Como já discutido, o processo de fusão nuclear ocorre quando dois núcleos são fundidos, requerendo que eles se aproximem a uma distância inferior a 10^{-15} metros, onde serão atraídos pela força nuclear forte. No entanto, para que essa aproximação ocorra, é necessária uma quantidade de energia maior que a força eletromagnética, uma vez que os núcleos, ambos carregados positivamente, se repeliriam devido às suas cargas. Em resumo, a fusão nuclear é iniciada quando uma quantidade de energia superior à força eletromagnética é introduzida no processo, permitindo que os núcleos se aproximem na região da força nuclear forte.

De acordo com Damasio e Tavares (2010), para que ocorra um ganho líquido de energia no processo de fusão, é fundamental que seja liberada mais energia do que aquela fornecida para unir os núcleos, superando assim a força eletromagnética.

Ainda não é possível utilizar a fusão nuclear de forma satisfatória para beneficiar a sociedade, devido à falta de meios seguros de controlar o processo de fusão nuclear.

2.11 BOMBAS NUCLEARES

As tensões e conflitos resultantes da Primeira Guerra Mundial lançaram o mundo em um período turbulento que eventualmente desencadearia na Segunda Guerra Mundial. Neste conflito, estariam em lados opostos os principais membros do Eixo (Alemanha, Itália e Japão) e os Aliados (Inglaterra, França, União Soviética e EUA).

Werner K. Heisenberg, renomado físico que formulou um dos pilares da mecânica quântica, o princípio da incerteza, seria, segundo Damasio e Tavares (2010), um defensor fervoroso das políticas antisemitas de Hitler e, por lealdade ao nazismo, teria rejeitado ofertas de universidades estrangeiras. Em 1940, Heisenberg escreveu um artigo descrevendo como construir um reator de fissão controlada utilizando um dos isótopos de urânio em quantidade suficiente para liberar energia de acordo com a famosa equação $E=mc^2$, ao ser bombardeado com nêutrons em baixa velocidade.

De acordo com Damasio e Tavares (2010), esse artigo serviu como base para o início do projeto atômico nazista. No entanto, algumas tentativas falharam devido à falta de quantidade mínima dos isótopos de urânio-235 necessários para a reação em cadeia.

Simultaneamente, pesquisas realizadas por Walter Zinn e Leo Szilard, na Universidade de Columbia, e por Fermi com seus colaboradores, exploravam a emissão de nêutrons na fissão do urânio. Os resultados dessas pesquisas foram publicados em abril de 1939, demonstrando a possibilidade de iniciar uma reação em cadeia a partir dos nêutrons produzidos na fissão.

Temendo as consequências da detonação de bombas nucleares durante a Segundo Guerra Mundial, o físico Albert Einstein escreveu uma carta ao presidente dos Estados Unidos (CNEN, s. d., p. 21-23):

ALBERT EINSTEIN
 Old Grove Road
 Nassau Point
 Perconic, Long Island
 August, 2nd, 1939

Senhor Presidente,

Algumas pesquisas desenvolvidas recentemente por E. Fermi e L. Szilard, cujas comunicações me foram entregues em manuscritos, introduziram-me a considerar que o elemento urânio possa ser transformado, num futuro próximo, em uma nova e importante fonte de energia. Alguns aspectos da situação justificam certa vigilância e uma rápida intervenção por parte da administração estatal. Considero, portanto, que seja meu dever solicitar a Vossa Excelênciagrnade atenção para os fatos e recomendações que seguem:

Nos últimos quatro meses, foi confirmada a possibilidade (graças aos trabalhos de Juliet Currie, na França e os de Fermi e Szilard, na América) que torna possível produzir, em uma grande massa de urânio, uma "reação nuclear em cadeia" capaz de gerar grande quantidade de energia e numerosos elementos com característica semelhantes ao rádio. Atualmente, temos quase certeza que podemos chegar a estes resultados em um futuro imediato.

Este novo fenômeno poderá permitir a construção de bombas extremamente potentes. Uma única bomba deste novo tipo, transportada por uma embarcação e explodindo num porto, poderá destruir o porto e grande parte do território adjacente. Todavia, elas devem ser relativamente pesadas para serem transportadas por avião.

Os estados unidos dispõem de uma quantidade pequena de minério com baixo teor de urânio. Encontramos bons minérios de urânio no Canadá e na Tchecoslováquia, sendo que os países que possuem as melhores minas de urânio é o Congo Belga.

Em função de toda esta situação, seria interessante e oportuno um contato permanente entre a alta administração do governo e o grupo de físicos que estão estudando a "reação em cadeia" na América. Uma das maneiras de realizar tal ligação seria a escolha de uma pessoa que gozasse da sua confiança e que pudesse agir de maneira não oficial. As suas contribuições seriam as seguintes:

a) manter o governo informado dos desenvolvimentos recentes neste campo e formular recomendações através de intervenções do Estado, para assegurar aos Estados Unidos o suprimento necessário de material urinífero;
 b) acelerar o trabalho no campo experimental que se desenvolve atualmente nos laboratórios das universidades de maneira limitada, fornecendo mais financiamento, ou caso seja necessário, mantendo contato com empresas privadas dispostas a colaborar com essa causa, e procurando a participação de laboratórios industriais que disponham de aparelhagem necessária.

Sou conhecedor do fato de que a Alemanha efetivamente bloqueou a venda de urânio das minas da Tchecoslováquia, das quais tomou posse. A decisão de agir rapidamente desta forma pode ser explicada pelo fato de que o filho do subsecretário de Estado, Von Weizsäcker, trabalha no Kaiser-Wilhelm-Institut de Berlim, onde estão sendo realizadas, em partes, as mesmas pesquisas sobre o urânio que se desenvolve nos Estados Unidos

Cordialmente, Albert Einstein

Diante dos relatos apresentados, tornou-se evidente uma corrida tanto por parte dos aliados quanto dos cientistas alemães para a construção de uma bomba atômica. No entanto, como a história demonstra, o projeto aliado, conhecido como

Projeto Manhattan, coordenado pelo físico judeu J. Robert Oppenheimer, obteve mais êxito do que o projeto alemão, coordenado por Heisenberg.

Inaugurado em 1943, o centro de pesquisa Los Alamos, localizado no estado do Novo México, marcou o início da construção da bomba dos aliados. Com a colaboração de cientistas renomados, como Richard Feynman e Hans Bethe, o projeto culminou na explosão da primeira bomba, conhecida como Trinity, o teste foi realizado em 16 de julho de 1945, no deserto do Novo México.

Em 6 de agosto de 1945, a aproximadamente 600 metros do chão, a bomba conhecida como "*Little Boy*" foi detonada sobre Hiroshima, seguida, três dias depois, pela explosão da bomba atômica "*Fat Man*" a 450 metros do solo de Nagasaki, ambas cidades japonesas (Damasio; Tavares, 2010).

Em contraste com as bombas atômicas utilizadas durante a Segunda Guerra Mundial, que se baseiam no processo de fissão nuclear, as bombas de hidrogênio liberam energia por meio de fusão nuclear. Segundo Damasio e Tavares (2010), para iniciar a fusão nuclear, é necessário fornecer energia de ativação com altas temperaturas, e para isso são utilizadas bombas de fissão nuclear.

Os dois países que explodiram bombas de hidrogênio foram URSS e EUA, a URSS explodiu em 1953, a "*Joe 4*" com poder de 10 megatons, que é cerca de 10 vezes maior que a "*Trinity*", a segunda, de 50 megatons, foi explodida em 1961, já os EUA explodiram a primeira bomba de hidrogênio, conhecida como "*mike*", em 1956.

Pelo visto, a radioatividade engloba um conjunto de fenômenos poderosos e que liberam grandes quantidades de energia. Quando os fenômenos radioativos são controlados, é possível obter inúmero benefícios. Porém, quando a radiação nuclear é explorada de forma negligente podem acontecer acidentes sérios. Dessa forma, conhecer a radioatividade permite se beneficiar sem medo. Os objetos de conhecimento relacionados à radioatividade são previstos no currículo de Pernambuco e na BNCC, conforme veremos a seguir.

2.12 A RADIOATIVIDADE NA BASE NACIONAL COMUM CURRICULAR E NO CURRÍCULO DE PERNAMBUCO PARA O ENSINO MÉDIO

É crucial uma construção sólida do conhecimento acerca da radioatividade no ambiente escolar. No 9º ano do ensino fundamental, a BNCC propõe a abordagem das radiações e suas aplicações na saúde como objeto de conhecimento (Brasil,

2018, p. 350). Já no Ensino Médio, a BNCC incentiva a utilização do entendimento sobre as radiações e suas origens para analisar as potencialidades e riscos de sua aplicação em equipamentos do cotidiano, na saúde, no ambiente, na indústria, na agricultura e na geração de energia elétrica (Brasil, 2018, p. 555). Além de outras habilidades, especialmente para os terceiros anos, que estão relacionadas à temática da radioatividade.

Ainda de acordo com a BNCC, é preciso contextualizar os conteúdos dos componentes [...] com base na realidade do lugar e do tempo nos quais as aprendizagens estão situadas (BRASIL, 2018, p.16). Para tanto, é necessário a reorganização dos paradigmas que sustentam às metodologias tradicionais de ensino e aprendizagem baseadas na transmissão do conhecimento, na memorização mecânica e no autoritarismo, cientes de que a metodologia tradicional não configura como um meio a ser afastado do processo de ensino e aprendizagem, mas de reorganização e conexão com outras metodologias.

O Currículo de Pernambuco, documento norteador para a etapa do Ensino Médio do estado, que está articulado com as diretrizes da BNCC, estabelece a reorganização de conhecimentos, habilidades e competências em função das mudanças determinadas pela Lei 13.415/2017. Já no primeiro ano do Ensino Médio, o currículo orienta como objetos de conhecimento noções de radioatividade e datação com carbono-14. Na terceira série do Ensino Médio, a abordagem se expande para incluir o ensino da atomística clássica e quântica, conceitos de radioatividade, e a análise das potencialidades e riscos da aplicação da radioatividade em equipamentos de uso cotidiano, na saúde, no ambiente, na indústria, na agricultura e na geração de energia elétrica.

Essa abordagem curricular está diretamente alinhada com a habilidade (EM13CNT103) da BNCC, que envolve a aplicação do conhecimento sobre radiações para avaliar suas potencialidades e riscos em diferentes contextos. Com efeito, essa habilidade permite examinar como a radiação é utilizada em diversas áreas, como equipamentos médicos, processos industriais, agricultura e geração de energia elétrica. A avaliação dos benefícios e riscos associados a essas aplicações é essencial para compreender a importância e os desafios do uso de radiações, destacando tanto as suas contribuições quanto os cuidados necessários para sua aplicação segura.

A habilidade específica do Currículo de Pernambuco (2021) para o componente de Química (EM13CNT103QUI05PE), que aborda a compreensão das mudanças de paradigmas entre a visão clássica e o modelo quântico do átomo, se conecta de maneira significativa com o estudo da radioatividade. Este aspecto permite analisar como a evolução dos modelos atômicos influenciou a compreensão da radioatividade, incluindo fenômenos como fissão e fusão nuclear, a emissão de radiações alfa, beta e gama, e conceitos fundamentais como meia-vida e decaimento radioativo.

Assim, o estudo dessas transformações nucleares proporciona uma base sólida para entender como a radioatividade é descrita e compreendida na Física Moderna. Adicionalmente, a relação entre essas habilidades e a radioatividade inclui a análise dos impactos sociais e ambientais da utilização de radiações. Isso envolve a discussão dos riscos associados ao armazenamento de resíduos nucleares, os impactos ambientais resultantes de acidentes nucleares, e as medidas de segurança necessárias para proteger a saúde humana e o meio ambiente. A avaliação de políticas e práticas voltadas para o manejo seguro de materiais radioativos e o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e radioproteção.

Contudo, o estudo da radioatividade está também associado à inovação e sustentabilidade em tecnologias energéticas. A discussão sobre inovações tecnológicas que visam tornar o uso da energia nuclear mais seguro e sustentável inclui a pesquisa sobre novos tipos de reatores nucleares, métodos para o reprocessamento de combustível nuclear e estratégias para minimizar a produção de resíduos radioativos. Avaliar a viabilidade dessas tecnologias e como elas podem reduzir os impactos ambientais e sociais é uma parte essencial da compreensão das aplicações da radioatividade e de sua integração em um contexto energético mais sustentável.

Em consonância com as habilidades mais específicas mencionadas, a BNCC enfatiza a habilidade (EM13CNT309), que se propõe a analisar questões socioambientais, políticas e econômicas relacionadas à dependência contemporânea dos recursos fósseis. Esta habilidade também abrange a discussão da necessidade de introdução de alternativas e novas tecnologias energéticas e materiais, além da comparação entre diferentes tipos de motores e processos de produção de novos materiais.

A habilidade de analisar questões socioambientais, políticas e econômicas relativas à dependência dos recursos fósseis e discutir a necessidade de introdução

de alternativas e novas tecnologias energéticas pode ser diretamente associada à radioatividade ao considerar a energia nuclear como uma alternativa aos combustíveis fósseis. A energia nuclear, que se baseia na fissão de átomos, como o urânio, representa uma importante fonte de energia alternativa, destacando-se por seu baixo impacto nas emissões de gases de efeito estufa. No entanto, é essencial ponderar os riscos associados à radioatividade, como a possibilidade de acidentes nucleares e os desafios referentes ao descarte de resíduos radioativos.

Ao comparar diferentes tipos de motores e processos de produção de energia, como aqueles movidos por combustíveis fósseis e os reatores nucleares, é importante discutir questões relacionadas à eficiência energética, à produção de eletricidade e aos impactos ambientais. Enquanto os motores que utilizam combustíveis fósseis liberam gases poluentes, a energia nuclear, por sua vez, não gera emissões diretas de CO₂. Contudo, envolve desafios complexos, como a segurança nuclear e a gestão de resíduos radioativos.

Além disso, ao considerar as questões socioambientais e políticas, observa-se que a dependência de combustíveis fósseis e seus consequentes impactos ambientais, como as mudanças climáticas, contrastam com a energia nuclear, que, embora seja uma alternativa viável, apresenta desafios significativos. Aspectos como o descarte seguro de resíduos radioativos, os riscos de acidentes, exemplificados por casos como Chernobyl e Fukushima, e os altos custos de construção e manutenção de usinas nucleares são centrais para o debate sobre a viabilidade dessa fonte energética. Portanto, ao discutir a dependência dos recursos fósseis e a necessidade de novas tecnologias energéticas, a radioatividade, no contexto da energia nuclear, oferece um exemplo relevante de como é possível reduzir essa dependência, ao mesmo tempo em que exige uma avaliação crítica de seus impactos e riscos associados.

Já relacionando a habilidade (EM13CNT307), que corresponde a analisar as propriedades específicas dos materiais para avaliar a adequação de seu uso em diferentes aplicações e/ou propor soluções seguras e sustentáveis, à radioatividade no contexto de materiais utilizados para blindagem contra radiações e no armazenamento seguro de resíduos radioativos. Na indústria nuclear, por exemplo, materiais com alta densidade, como chumbo, concreto e água, são amplamente utilizados para impedir a penetração de radiações ionizantes, como os raios gama e

partículas beta, garantindo a segurança tanto em instalações nucleares quanto em ambientes hospitalares que utilizam tecnologias de radiação, como radioterapia.

Além disso, a análise das propriedades dos materiais é crucial no desenvolvimento de soluções para o armazenamento de resíduos nucleares de maneira segura e sustentável. A radioatividade desses resíduos requer materiais que possam conter as radiações por longos períodos, minimizando os riscos ambientais e de exposição. Nesse sentido, o estudo das propriedades físicas, como a resistência à radiação, a durabilidade e a capacidade de isolamento, é fundamental para garantir a adequação dos materiais em tais aplicações tecnológicas e industriais.

A habilidade (EM13CNT306) da BNCC, que se refere à avaliação dos riscos envolvidos em atividades cotidianas e à aplicação de conhecimentos das Ciências da Natureza para justificar o uso de equipamentos e comportamentos de segurança, tem uma relação crucial com a aprendizagem da temática da radioatividade para garantir a integridade física e socioambiental em contextos que envolvem a manipulação e exposição a materiais radioativos.

No contexto da radioatividade, a avaliação de riscos envolve a compreensão dos potenciais perigos associados à exposição a radiações ionizantes, como radiações alfa, beta e gama. Essas radiações podem ter efeitos prejudiciais à saúde, como aumento do risco de câncer e danos aos tecidos biológicos, dependendo da intensidade e da duração da exposição. Portanto, é fundamental aplicar conhecimentos científicos para identificar e mitigar esses riscos, garantindo a proteção individual e coletiva.

Portanto, a aplicação da habilidade (EM13CNT306) no contexto da radioatividade envolve a integração de conhecimentos científicos para a implementação de medidas de segurança e proteção eficazes, assegurando a integridade física e socioambiental em atividades relacionadas à manipulação e uso de materiais radioativos.

Dessa maneira justifica-se a partir desses documentos uma abordagem didática que evidencie a aprendizagem dos processos de fissão e fusão nuclear, visto que são essenciais para compreender o funcionamento de materiais bélicos, como as bombas atômicas, assim como para compreender os processos de geração de energia a partir de reatores nucleares, buscando discutir os benefícios e riscos para a sociedade em seu contexto mais amplo.

2.13 CONSTRUÇÃO DO PENSAMENTO QUÍMICO

Observa-se que ainda há resistência por parte de alguns professores em relação à reorganização do ensino tradicional, o que pode dificultar os avanços nos processos de ensino e de aprendizagem. Alguns docentes ainda aderem à perspectiva de que basta dominar o conhecimento científico para transmiti-lo aos estudantes (Pozo; Crespo, 2009).

No entanto, é essencial destacar, conforme Schnetzler e Aragão (1995), que a função do ensino não se resume à mera transmissão de conhecimentos prontos e verdadeiros para os alunos, concebidos como "tábuas rasas" a serem preenchidas com informações. Segundo essas autoras, a aprendizagem não é mais vista como uma simples recepção ou internalização de informações externas, ditadas pelo professor, mas sim como um processo de reorganização, desenvolvimento ou evolução das concepções dos próprios alunos.

Assim, um caminho possível para o declive destes paradigmas são as percepções construtivistas de aprendizagem, onde o estudante passa a ser estimulado a construir e protagonizar o seu aprendizado, é o aprender para aprender. O professor deixa de ser o centro do saber em sala de aula para ser o mediador das ações, que fortalecem a autonomia, o pensamento crítico e a interação coletiva, uma educação que compreenda que a aprendizagem deve ser construída levando em consideração todas as dimensões do conhecimento. Becker (1992) comenta que para alcançar esse objetivo, é fundamental adotar uma abordagem educacional construtivista que incorpore uma perspectiva teórica abrangente capaz de integrar as diversas correntes de pensamento atuais. Essa abordagem visa promover uma aprendizagem significativa que esteja enraizada nas experiências reais e cotidianas dos alunos. Além disso, é crucial uma educação mais participativa, na qual o processo de aprendizado não se limite à mera transmissão de informações, mas se baseie na construção conjunta de conhecimento pelos alunos. Isso ocorre por meio de sua interação ativa com situações autênticas e com o suporte mediador e orientador oferecido pelos professores.

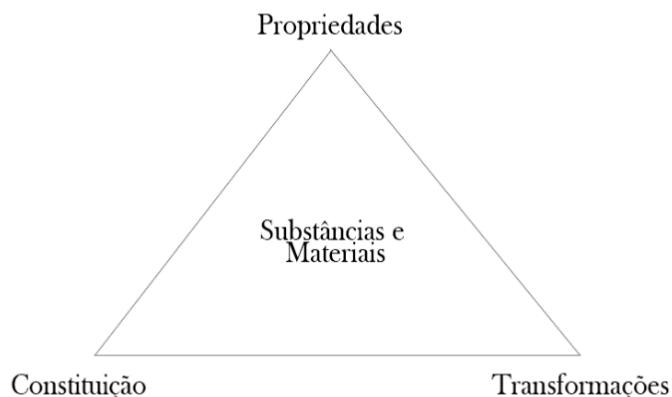
Inclusive, Maldaner (1997) vai além, considera a necessidade de superar tanto as propostas tradicionais, quantos as construtivistas de ensino de Química, uma vez que as tradicionais abordam conteúdos descentralizados, por meio de uma lógica do conhecimento sistematizado e as, construtivistas por não se mostrarem suficientes,

principalmente por serem descoladas do meio social mais amplo (Maldaner *apud* Machado, 1999). Para Machado (1999) as propostas de ensino desconsideram a inter-relação entre os fatos químicos e sua inserção e funcionamento no mundo, e que para a formação do pensamento químico seria importante uma tensão entre conceito e contexto.

Ainda segundo Machado (1999), para que um estudante comprehenda como a química pode possibilitar que eles elaborem formas de compreender o mundo é fundamental considerar as relações entre os recortes do conteúdo e os níveis de abordagem a serem considerados no ensino de Química. É a partir dessa perspectiva que são esquematizados dois triângulos que se referem aos temas de interesse da química e os níveis de conhecimentos químico.

O primeiro triângulo (Figura 11) está relacionado com os objetos de conhecimento, colocando no centro as substâncias e os materiais e nos vértices estão os aspectos de estudo e pesquisa da Química:

Figura 11 - Focos de Interesse da Química



Fonte: Adaptado de Machado (1999).

As transformações, constituição e propriedades das substâncias estão relacionadas com diferentes concepções que devem ser consideradas para estudar e investigar as substâncias e materiais (Machado, 1999).

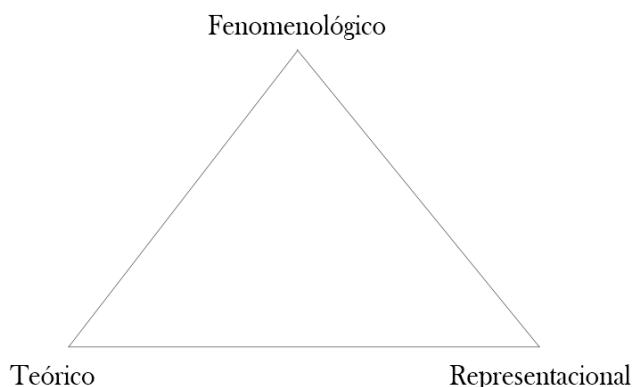
É contundente considerar uma gama de abordagens conceituais para uma compreensão mais abrangente e aprofundada das complexidades envolvidas nos processos de transformação, constituição e propriedades inerentes a essas

substâncias e materiais. A exploração da inter-relação desses aspectos proporciona um panorama mais enriquecedor, permitindo uma análise mais refinada das interações que regem o comportamento e as características das substâncias e materiais (Mortimer *et al.*, 2000).

A Química se fundamenta como uma área de conhecimento que se estrutura em torno de um tripé altamente específico, composto por três pilares fundamentais: as mudanças químicas, as características dos materiais e seus atributos, e os modelos explicativos (Mortimer *et al.*, 2000). Dessa forma, ao desempenhar o papel na configuração da base curricular nacional, estabelece-se uma organização do conhecimento químico que se edifica a partir dos três pilares previamente mencionados. Esses elementos, dinamicamente interligados, representam os objetos e os enfoques de interesse na disciplina da Química, tanto como Ciência autônoma quanto como componente curricular.

Para os níveis do conhecimento químico, representados na Figura 12, Machado (1999) busca inter-relações entre mundo-linguagem-pensamento como questão epistemológica básica para a construção do conhecimento nas aulas de Química:

Figura 12 - Níveis do Conhecimento Químico.



Fonte: Adaptado de Machado (1999).

Para Mortimer, Machado e Romanelli (2000):

O aspecto fenomenológico aborda os fenômenos que despertam o interesse na área da química, englobando tanto aqueles concretos e visíveis, como a alteração no estado físico de uma substância, quanto aqueles aos quais temos acesso apenas de forma indireta, como as interações entre radiação e matéria que não resultam em um efeito visível, mas podem ser identificadas por meio da espectroscopia (Mortimer, Machado; Romanelli, 2000, p. 276).

Para esses autores os fenômenos químicos não estão limitados àqueles que podem ser replicados em um laboratório. Abordar temas cotidianos também denota uma expressão fenomenológica, em que o fenômeno se materializa na interação social. Assim, na perspectiva do aluno, a Química está intimamente ligada às conexões sociais, destacando que esta ciência desempenha um papel presente na sociedade e no ambiente ao nosso redor (Mortimer; Machado; Romanelli, 2000, p. 276). Assim, para o nível de conhecimento fenomenológico ter êxito com a temática da radioatividade é necessária uma sequência de ensino e aprendizagem que promova uma contextualização com o cotidiano, que estimule os estudantes à compreensão do objeto de conhecimento. No caso da radioatividade, especialmente, as aplicações, riscos e benefícios para a saúde, o meio ambiente, a geração de energia, a sociedade etc. podem ser elementos contextualizadores.

Os aspectos teóricos associam-se às dimensões microscópicas, relacionadas ao átomo molecular, explicações que incluem os átomos, as moléculas, os íons, os elétrons etc. (Machado, 1999).

De acordo com Machado (1999), para que o aspecto teórico faça sentido para o estudante, é preciso manter uma associação entre experimentos e teoria num processo de ida e vinda. Um exemplo que ilustra a associação dos aspectos teóricos da radioatividade com as dimensões microscópicas é o decaimento beta de um átomo instável. Neste processo, que ocorre no nível subatômico, um nêutron no núcleo de um átomo se transforma em um próton e emite uma partícula beta (um elétron) e um antineutrino. Esse fenômeno envolve a interação de partículas elementares como nêutrons, prótons e elétrons, e afeta diretamente a composição do núcleo e, consequentemente, a identidade do átomo.

Essa transformação altera a proporção entre prótons e nêutrons, modificando o elemento químico e a carga do núcleo, uma vez que o aumento do número de prótons pode criar um novo íon derivado átomo. A teoria associada a esse fenômeno envolve a força nuclear fraca, que regula esse tipo de decaimento, e a força eletromagnética, que governa as interações entre partículas carregadas como prótons e elétrons.

Portanto, essa transformação teórica acontece na escala microscópica, influenciando o comportamento atômico e molecular do material radioativo, sem ser visível diretamente, mas com implicações macroscópicas observáveis, como a liberação de energia ou a mudança de propriedades químicas do elemento.

O aspecto representacional é representado pela natureza simbólica dos objetos de conhecimento, são informações que compreendem a linguagem química, como fórmulas e equações químicas (Machado, 1999). Ainda para esta autora, através da linguagem química o estudante vai construindo um pensamento químico. Diante disso o estudo da radioatividade também pode ser compreendido através destes três níveis distintos de conhecimento: o fenomenológico, o teórico e o representacional. Esses níveis se interconectam para fornecer uma visão abrangente e profunda do comportamento e das implicações da radioatividade.

No nível fenomenológico, os fenômenos radioativos são observados e descritos a partir de suas manifestações concretas e mensuráveis, como a emissão de radiação por elementos radioativos, os efeitos da radiação sobre a matéria e os organismos vivos, e os métodos de detecção e medição da radioatividade. Por exemplo, a descoberta da radioatividade por Henri Becquerel e os estudos subsequentes de Marie Curie ilustram como a observação de fenômenos naturais levou à identificação e caracterização de substâncias radioativas como o urânio e o rádio.

Avançando para o nível teórico, buscamos compreender os mecanismos subjacentes que explicam os fenômenos observados. Neste contexto, são exploradas as teorias nucleares e atômicas que descrevem a estrutura dos núcleos atômicos e os processos de decaimento radioativo. A teoria da desintegração nuclear, que explica como e por que certos núcleos atômicos são instáveis e se decompõem emitindo radiação é fundamental para compreender os processos de fissão e fusão nuclear.

No nível representacional, utilizam-se diversas formas de representação para modelar e comunicar o conhecimento teórico e fenomenológico. Diagramas, gráficos, equações e modelos computacionais são ferramentas essenciais para visualizar e entender os processos radioativos. Por exemplo, os diagramas de decaimento radioativo representam visualmente as séries de desintegração que elementos radioativos como o urânio e o tório seguem ao longo do tempo. As equações descrevem quantitativamente as taxas de decaimento e a energia liberada durante os processos de fissão e fusão.

Modelos computacionais permitem simular reações nucleares complexas, ajudando a prever os resultados de experimentos e a desenvolver novas aplicações tecnológicas. Assim, estabelecer conexões entre os aspectos fenomenológicos, teóricos e representacionais não apenas enriquece a compreensão dos fenômenos químicos, mas também fornece aos estudantes ferramentas essenciais para estruturar

um pensamento químico. A conexão entre os níveis do conhecimento químico – teórico, fenomenológico e representacional - promove uma aprendizagem mais significativa. Além disso, ao integrar conceitos científicos e cotidianos, os alunos não apenas ampliam sua compreensão, mas também desenvolvem uma perspectiva mais abrangente da Química, reconhecendo sua presença nos ambientes escolares, e nos aspectos práticos da vida diária. Essa abordagem integrada contribui para uma formação mais completa e para uma compreensão mais profunda desse componente curricular.

Pelo exposto, integrando metodologia de ensino por resolução de problemas, aos níveis fenomenológico, teórico e representacional, é possível proporcionar uma abordagem holística e interativa para a aprendizagem da radioatividade. Ela envolve os alunos em um ciclo contínuo de observação, reflexão, investigação e representação, promovendo um aprendizado ativo e contextualizado.

2.14 METODOLOGIA DE ENSINO POR RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

A metodologia de ensino por resolução de problemas surge como proposta de metodologia ativa que tem um papel importante para aprendizagem significativa dos estudantes. Para Fernandes e Campos (2017), a construção do conhecimento científico está associada à resolução de situações-problema ou problemas relevantes e interessantes para os estudantes.

Professores da área das Ciências da Natureza, como de outras áreas e níveis de ensino, através da metodologia de ensino por resolução de problemas, podem estimular a criatividade dos seus alunos, desenvolver a capacidade investigativa e o raciocínio para a resolução de problemas (Silva, 2013).

De acordo com Ribeiro (2010), a resolução de problemas é primordialmente uma metodologia de instrução caracterizada pelo uso de problemas da vida real para estimular o desenvolvimento do pensamento crítico e habilidades de solução de problemas e a aprendizagem de conceitos fundamentais. Para Meirieu (1998):

A situação-problema, simplesmente, põe o sujeito em ação, colocando-o em uma interação ativa entre a realidade e seus projetos, interação que desestabiliza e reestabiliza, graças as variações introduzidas pelo educador, suas representações sucessivas; e é nessa interação que se constrói, muitas vezes irracionalmente, a racionalidade (Meirieu, 1998, p. 63).

Diante do exposto, verifica-se a importância desta metodologia ativa no processo de ensino e aprendizagem dos estudantes, pois a metodologia de ensino por resolução de problemas, principalmente, quando executada de forma contextualizada e interdisciplinar, pode estimular a criatividade, o pensamento crítico, o raciocínio intelectual, etc.

Para Leite e Esteves (2005), com o aparecimento da metodologia baseada na resolução de problemas o ensino foi modificado e a posição o professor na sala de aula teve que sofrer alterações no sentido de quebrar o paradigma de detentor do saber, o responsável pela transmissão do conhecimento, e promover maior autonomia para o estudante na condução de sua aprendizagem. Neste contexto, entende-se que o estudante assume o papel de protagonista de sua própria aprendizagem, participando ativamente e engajando-se profundamente no processo proporcionado por esta metodologia.

Para Leite e Afonso (2001):

As razões que conduziram à dispersão do ensino orientado na metodologia por resolução de problemas por todo mundo têm a ver, por um lado, com o facto de ele permitir aos alunos tirarem o máximo de partido do estudo independente e, por outro lado, de utilizar a resolução de problemas em pequenos grupos, aspectos que têm a ver não só com a autonomia, mas também com a cooperação e a vida em sociedade. (Leite; Afonso, 2001, p. 254).

A aprendizagem através da metodologia de ensino por resolução de problemas não é tarefa apenas do aluno. Porém, uma aprendizagem centrada no aluno é a prática que gradualmente torna ele responsável pela sua aprendizagem e relaciona-se com as propostas da metodologia de ensino por resolução de problemas. Para Lopes *et al.*, (2019), como vantagem nesse processo, o estudante “aprende a aprender” de forma a conseguir atender a necessidade constante de adaptação do conhecimento contemporâneo, aos desafios e problemas que encontrarão no futuro.

O papel do professor, segundo Goi e Santos (2004) é de mediador do processo, para eles o professor deve estimular situações que propiciem uma aprendizagem através do pensar, do refletir, objetivando novos conceitos. Tanto nas atividades de lápis e papel como nas experimentais é fundamental que o professor não resolva os problemas para os alunos e aceite as diferentes resoluções propostas para cada problema (Goi; Santos, 2004).

2.15 A CONSTRUÇÃO DO PROBLEMA EFICAZ

Diversos fatores desempenham um papel crucial no sucesso das atividades na resolução de problemas (RP). Entre esses elementos determinantes destacam-se os objetivos almejados, os objetos de conhecimento a serem explorados, os conhecimentos que se deseja que os estudantes construam, a sequência didática empregada, o papel da mediação pedagógica, as classificações dos problemas e as características intrínsecas dos problemas selecionados etc. (Ribeiro; Passos; Salgado, 2020). Nesse contexto, os autores apresentam uma proposta que considera quatro características essenciais para a formulação de um problema eficaz.

Segundo Ribeiro, Passos e Salgado (2020), um problema eficaz destaca-se por contextualizar a temática, aproximando-a da vivência cotidiana do aluno e estabelecendo uma conexão significativa com a questão proposta. A contextualização a partir do cotidiano não apenas confere significado ao conteúdo em aprendizagem, mas também possibilita ao estudante relacionar as discussões em sala de aula com a realidade do seu dia a dia. Esse processo não só enriquece a experiência educacional, mas também promove uma compreensão mais profunda e aplicada do conhecimento.

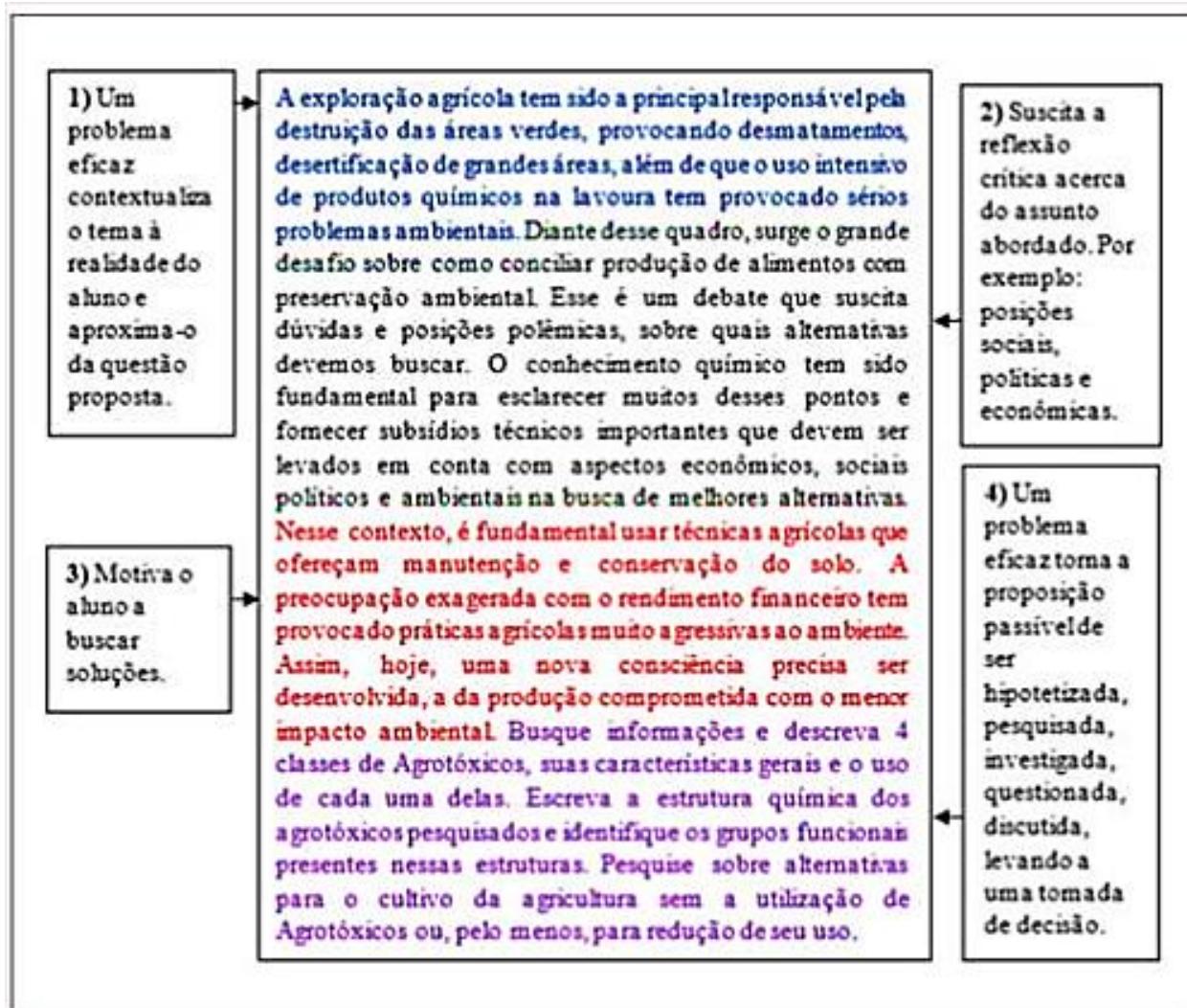
Ainda para Ribeiro, Passos e Salgado (2020), além desse aspecto, um problema eficaz deve ser capaz de suscitar a reflexão crítica acerca do assunto abordado, incentivando os estudantes a analisarem os conteúdos de maneira profunda e reflexiva. Nas aulas de ciências, é fundamental que os problemas propostos estimulem a reflexão crítica e ofereçam oportunidades para que os alunos construam seus próprios conhecimentos diante do desafio apresentado. Quando a metodologia de ensino proporciona essa capacidade de reflexão crítica, o estudante passa a compreender melhor o mundo ao seu redor, e também desenvolve habilidades que o capacitam a agir e, potencialmente, a transformar o ambiente ao seu redor.

Outro aspecto a ser considerado é que um problema eficaz não apenas deve motivar os alunos a buscar soluções, mas também estimular o pensamento reflexivo e a aplicação prática do conhecimento construído. A motivação é fundamental, pois favorece a ocorrência da aprendizagem e impulsiona a aplicação efetiva das competências e habilidades construídas. É importante ressaltar que, conforme destacado por Fernandes e Campos (2017), um problema precisa ser intrinsecamente motivador para que os estudantes se engajem de forma eficaz em sua resolução.

Nesse sentido, o conteúdo relevante desempenha um papel essencial, estimulando os estudantes a se envolverem ativamente na busca por soluções.

Na Figura 13, os autores Ribeiro, Passos e Salgado (2020) descrevem as 4 características de um problema eficaz.

Figura 13 - Problema com as características de um problema eficaz.



Fonte: Ribeiro; Passos e Salgado (2020).

Um problema eficaz deve propiciar não apenas a formulação de hipóteses, mas também a realização de pesquisas, investigações, questionamentos e discussões, culminando em uma tomada de decisão alinhada às questões propostas. Essas quatro características, quando presentes de maneira equilibrada, não apenas fomentam a eficácia da resolução de problemas como metodologia de ensino, mas também promovem um ambiente propício ao desenvolvimento integral do estudante, incentivando a autonomia, a criatividade e o pensamento crítico. Diante do exposto

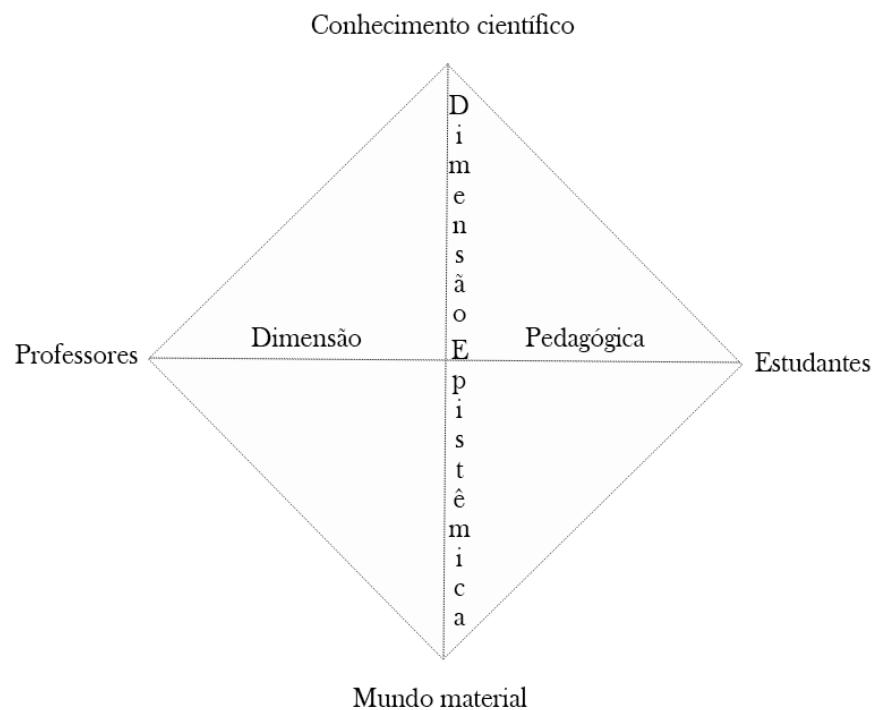
destacamos que neste projeto será elaborado um problema considerando as quatro características destacadas pelos autores Ribeiro, Passos e Salgado (2020).

2.16 SEQUÊNCIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM POR RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Uma sequência de ensino e aprendizagem (SEA) evidencia a estreita conexão entre o ensino proposto e a aprendizagem esperada que o estudante construa, caracterizando-se como uma abordagem específica de ensino organizada por tópicos e enriquecida com pesquisa (Meheut; Psillos, 2004).

De acordo com Meheut e Psillos (2004), o desenvolvimento de uma SEA requer a consideração de dimensões epistêmicas e pedagógicas, conforme ilustrado na Figura 14. Na dimensão epistêmica (vertical), a relação entre o conhecimento científico e o mundo material é destacada, enquanto na dimensão pedagógica (horizontal), são apresentadas as perspectivas dos papéis desempenhados pelo professor e pelo estudante.

Figura 14 - Relações epistêmica e pedagógica para uma sequência de ensino e aprendizagem.



Fonte: Adaptado de Silva e Wartha (2018).

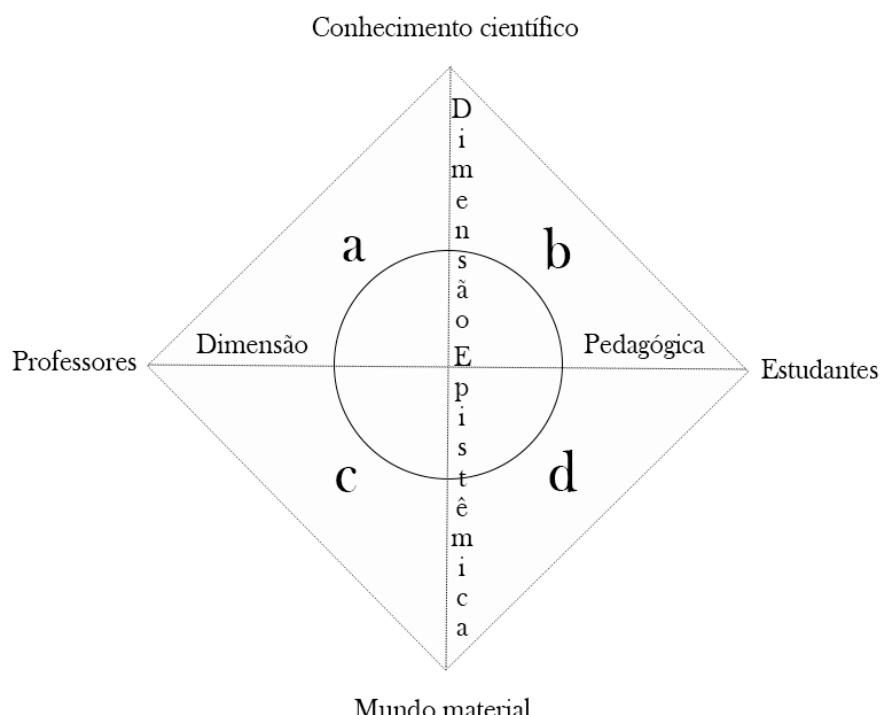
Segundo Méheut (2005), as dimensões epistêmicas e pedagógicas devem ser abordadas de maneira integrada, seguindo uma perspectiva construtivista. Isso implica que tanto o conhecimento a ser desenvolvido quanto os sujeitos envolvidos têm importância no processo, permitindo ao estudante atribuir significado à atividade de ensino e aos objetos de conhecimento.

A dimensão epistêmica está relacionada à natureza do conhecimento, abordando sua construção histórica (Silva; Wartha, 2018). Além disso, essa dimensão relaciona esses conhecimentos com o mundo material, onde encontram-se os fenômenos, pessoas e a natureza.

A dimensão pedagógica orienta o papel do professor e as formas de interação entre professor e aluno (Méheut; Psillos, 2004). Para Silva e Wartha (2018), a dimensão pedagógica permite ao professor criar discussões que incentivam os estudantes a pesquisar e analisar a temática abordada por diferentes perspectivas.

Com base no modelo do losango didático, Silva e Wartha (2018) exploram discussões relacionadas ao processo de ensino e aprendizagem, abordando implicitamente as questões de ensino nos quatro quadrantes (“a”, “b”, “c” e “d”), conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Circunferência das relações epistêmicas e pedagógicas.



Fonte: Adaptado de Silva e Wartha (2018)

No quadrante “a”, os autores abordam a interação entre o professor e o conhecimento científico, implicitamente ressaltando a necessidade de questionar o conhecimento científico presente nos currículos e promover uma formação docente que estimule o professor a romper com apresentações de conhecimento previamente elaborado, proporcionando liberdade aos estudantes para uma abordagem investigativa. No quadrante “b”, discutem a relação entre conhecimento científico e estudante, enfatizando a importância de levar em consideração as concepções prévias e alternativas dos estudantes para aproximar o estudante do entendimento do conhecimento científico.

Para Silva e Wartha (2018), os modelos de aprendizagem centrados na transmissão de conhecimentos, em detrimento do respeito aos conhecimentos prévios dos estudantes, não favorecem uma aprendizagem eficiente da Ciência. O quadrante “c” aborda a relação entre professor e mundo material, explorando a necessidade de contextualização que vá além do conceitual e considere os problemas sociais. O quadrante “d” discute as ideias prévias dos estudantes e suas relações com o mundo material, reconhecendo que os estudantes estão constantemente envolvidos com o mundo material antes de aprender Ciência na escola (Silva; Wartha, 2018).

Ao criar uma circunferência na interseção entre as duas dimensões do losango didático, Silva e Wartha (2018) estabelecem um equilíbrio nas relações entre conhecimento científico, mundo material, aluno e professor. O equilíbrio entre os quadrantes ocorrerá quando os professores desenvolverem abordagens de ensino que aproximem o conhecimento científico do mundo material, relacionando conceito e contexto, além de criar instrumentos que promovam a dialogicidade entre professor e estudante (Silva; Wartha, 2018).

Nessa perspectiva, uma sequência de ensino e aprendizagem permitirá a efetiva construção do conhecimento quando elaborada visando à inter-relação entre as dimensões epistêmicas e pedagógicas propostas por Meheut e Psillos (2004), conduzindo à região proximal da circunferência, conforme discutido por Silva e Wartha (2018).

Para Freitas, Campos e Batinga (2017):

Desta forma, a realização de uma sequência didática pautada na estratégia por resolução de problemas e direcionada para o ensino da química, propicia ao aluno o aprendizado dos conteúdos químicos por meio da relação entre o mundo real e o conhecimento científico. E ao mesmo tempo, promove uma maior interação entre professor e aluno e uma maior autonomia ao estudante durante o processo de ensino e aprendizagem. (Freitas; Campos; Batinga, 2017, p. 7).

2.17 ENSINO ORIENTADO PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Independentemente de a tarefa estar bem ou mal definida, a solução de um problema exige a compreensão da tarefa, a elaboração de um plano, sua execução e uma análise final para verificar se a meta foi alcançada.

Além disso, o processo de resolução de problemas envolve a análise de situações, o desenvolvimento de estratégias, a busca de informações e o teste de hipóteses. Quando o aluno participa desse processo, ele mobiliza conceitos, raciocina, reflete e desenvolve autonomia (Batinga, 2010).

Batinga (2010) afirma que a solução de um problema começa com sua definição ou pela conscientização. A formulação delimita o campo de busca intelectual, especificando os objetivos e as condições necessárias para a solução. No Quadro 1, Batinga (2010) destaca algumas características inerentes à investigação científica, que são pertinentes para caracterizar o processo de resolução de problemas e podem ser aproximadas ao contexto da sala de aula.

Quadro 1 - Características inerentes à investigação científica.

<p>1 - Os problemas científicos surgem de situações problemáticas de caráter amplo e de que os sujeitos têm interesse por diversos motivos. Nesse sentido, os problemas precisam ser delimitados. Dito de outra forma, a busca de soluções para os problemas implica que realmente seja delimitado qual é o problema, o que se quer buscar, partindo inicialmente dos conhecimentos de que já se dispõe no campo específico da investigação.</p>
<p>2 - O avanço no problema é direcionado por hipóteses, por tentativas de respostas, que devem ser colocadas à prova com o maior rigor possível. O contexto hipotético dedutivo é característico da atividade científica criativa, nesse sentido, não se pode chegar ao conhecimento científico aplicando um processo indutivo de inferência a partir de dados já conhecidos, sendo fundamental tentar construir respostas possíveis para os problemas estudados.</p>

3 - As investigações não se encontram, de um modo geral, com os dados como ponto de partida e sim com situações problemáticas confusas. As grandezas que se consideram relevantes para avançar no problema e os dados são selecionados em função da definição do problema e das hipóteses formuladas.
4 - Não se raciocina em termos de certeza, nem alcança o conhecimento científico apenas observando a natureza e sim em termos de hipóteses, sendo necessário duvidar dos resultados obtidos e de todo o processo de resolução. Isso obriga a interpretar e confrontar os resultados, mediante sua coerência com as hipóteses formuladas, a procurar diferentes caminhos para ver se se obtém o mesmo resultado, a rever a coerência global com o já conhecido nesse campo ou a ver se de fato abre e permite avançar em novos problemas de interesse. Isso pode conduzir a rever as hipóteses, a estratégia de resolução, ou inclusive, a reformular o problema de forma distinta.

Fonte: Adaptado de Batinga (2010).

No Quadro 2, Batinga (2010) apresenta alguns indicadores de um processo de resolução de problemas, em particular para a disciplina de Química, que buscam certa coerência com a metodologia de investigação científica.

Quadro 2 - Indicadores de um processo de resolução de problema para a disciplina de Química.

- 1) Apresentação de enunciados não diretos (do tipo exercício): significa que o enunciado de um problema não deve conter de um modo exaustivo condições, dados, ou ferramentas que indiquem os passos a seguir antes de fazer o planejamento com o objetivo de saber o que se busca para resolver o problema. Incentivar a estruturação de enunciados dos problemas que favoreçam, em vez de bloquear, a resolução do problema no sentido de propiciar a indagação científica, como por exemplo, considerar no enunciado do problema situações que despertem o interesse do aluno, bem como as suas experiências e o contexto social e natural em que eles estão inseridos procurando buscar uma relação desses aspectos com o conhecimento químico.
- 2) Realização de um planejamento qualitativo da situação, imaginando a situação química, procurando levantar e delimitar de maneira precisa o problema, deixando explícito do que é que se trata de determinar e em que condições será resolvido o problema.

3) Formulação de hipóteses sobre os fatores que podem depender a grandeza buscada e sobre a forma desta dependência, incluindo, em particular, casos limites de fácil interpretação química que necessariamente deverá contemplar o resultado do problema.
4) Elaboração com caráter tentativo de possíveis estratégias de resolução antes de proceder a esta, para possibilitar uma confrontação rigorosa das hipóteses e mostrar a coerência com o corpo de conhecimento químico de que se dispõe para resolver o problema. Não apresentar a estratégia de resolução como algo evidente e seguro.
5) Resolução de problemas como o fazer prático da estratégia planejada, verbalizando o que se faz durante o processo de resolução, procurando evitar operações mecânicas carentes de significação química.
6) Análise dos resultados obtidos a luz das hipóteses elaboradas e em particular dos casos limites considerados, sempre buscando duvidar dos resultados obtidos.
7) Consideração das possíveis perspectivas que são abertas após a resolução do problema, contemplando, por exemplo, a possibilidade de abordar o problema num nível maior de complexidade ou de abordar novas situações de interesse prático e teórico. Esta reflexão sobre novas perspectivas deveria incluir uma breve recapitulação sobre as dificuldades encontradas no processo de resolução do problema e a forma como foram superadas. Isso contribui para melhorar a capacidade para enfrentar os novos problemas.

Fonte: adaptado de Batinga (2010).

Esses procedimentos envolvem: a aquisição da informação, a interpretação da nova informação, a análise e inferência sobre a informação disponível, a compreensão e avaliação dos resultados, bem como o processo de reorganização conceitual da informação. Além disso, incluem os métodos de comunicação da informação. Essas etapas são fundamentais para garantir uma abordagem estruturada e eficaz na resolução de problemas em diversos contextos.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Esta investigação trata-se de uma pesquisa qualitativa de natureza interventiva, dada a necessidade de realizar uma intervenção didática, aplicando uma sequência de ensino e aprendizagem baseada na resolução de problemas e avaliando as contribuições alcançadas. A realização desta pesquisa foi autorizada pelo Comitê de ética na Pesquisa com Seres Humanos da Universidade Federal Rural de Pernambuco sob o parecer nº 7.305.279.

Segundo Damiani *et al.*, (2013), as pesquisas do tipo intervenções pedagógicas são investigações que envolvem o planejamento e implementação de interferências – destinadas a produzir avanços, melhorias, nos processos de aprendizagem dos sujeitos participantes – e a posterior avaliação dos efeitos dessas interferências. Assim são discutidos, na metodologia, a identificação e separação de dois componentes: o método da intervenção (método de ensino) e o método da avaliação da intervenção (método de pesquisa propriamente dito) (Damiani *et al.*, 2013).

Segundo Damiani *et al.*, (2013), o método de intervenção está relacionado ao método de ensino aplicado, justificando a adoção das diferentes práticas específicas planejadas e implementadas. Neste momento o foco está no agente da intervenção, o professor. Já o método de avaliação da intervenção é a parte que deixa mais claro o caráter investigativo da intervenção, nele o objetivo é descrever os instrumentos de coleta e análise de dados utilizados para capturar os efeitos da intervenção.

3.2 CONTEXTO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada em uma escola da rede estadual de ensino, localizada no município do Cabo de Santo Agostinho, Região Metropolitana do Recife. A escolha por essa instituição ocorreu em razão de o pesquisador já ter atuado como docente na escola, em regime integral, o que favoreceu maior disponibilidade de horários para acompanhar e contribuir com os estudantes participantes da investigação. Tomaram parte do estudo, alunos da 3^a série do Ensino Médio, que, para fins de identificação na pesquisa, foram denominados de E.1 a E.32. O Novo currículo de Pernambuco, alinhado à BNCC, prevê a abordagem da radioatividade no Ensino Médio. Nesse sentido, observa-se o atendimento à habilidade EM13CNT103 da BNCC alinhada a seguinte competência: *“Utilizar o conhecimento sobre as radiações e suas origens*

para avaliar as potencialidades e os riscos de sua aplicação em equipamentos de uso cotidiano, na saúde, no ambiente, na indústria, na agricultura e na geração de energia elétrica” (Brasil, 2018, p. 555).

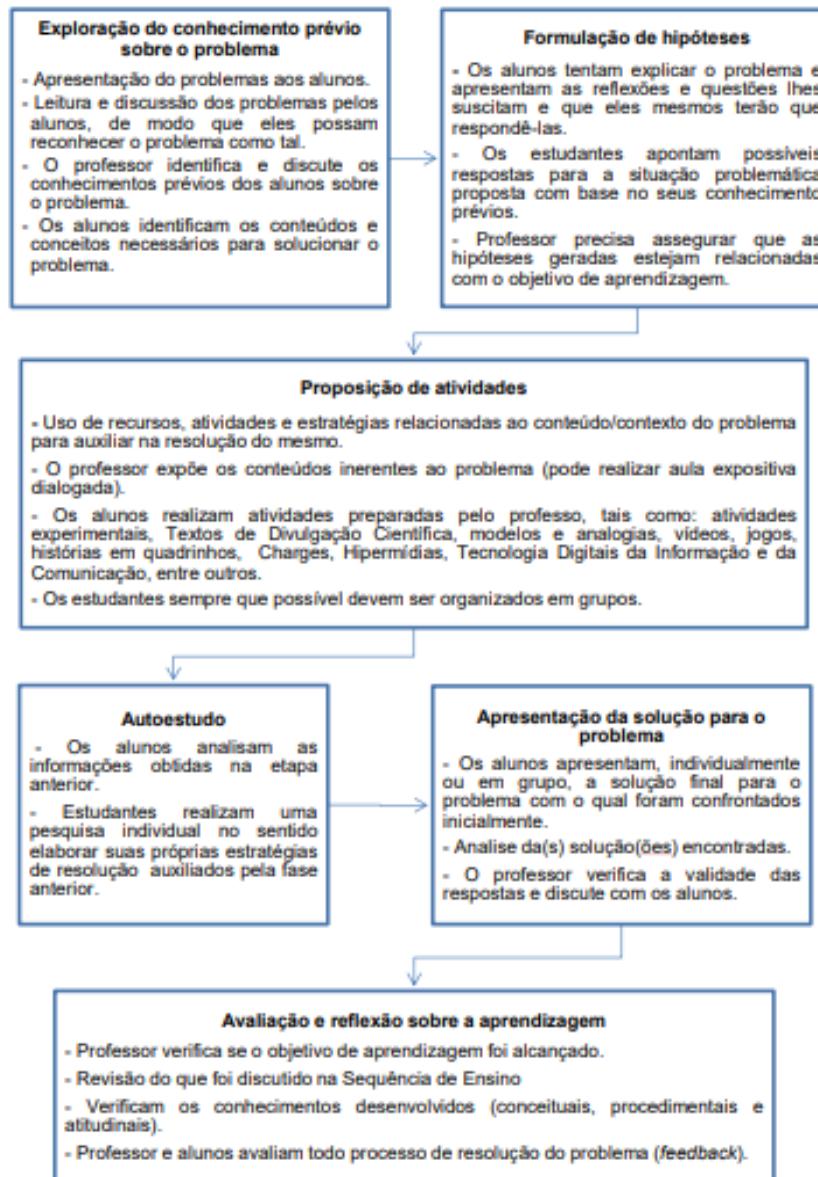
3.3 ETAPAS METODOLÓGICAS

A partir da análise de aspectos metodológicos da resolução de problemas preconizados por Pozo (1998), Castillo (1998), Leite e Afonso (2001) e Leite e Esteves (2005). Freitas (2022) observa que as propostas desses autores convergem em diversos aspectos, tais como: iniciar as atividades de aprendizagem confrontando os estudantes com um problema; o levantamento de hipóteses; a definição do problema pelos próprios alunos, reconhecendo-o como tal; a utilização de recursos didáticos para auxiliá-los na busca por soluções; a promoção de atividades em grupo, com o intuito de favorecer a interação entre professor-aluno e aluno-aluno; a apresentação da solução (ou não) para o problema, após a participação dos alunos nas etapas precedentes à exposição da resposta final; e, por fim, a avaliação, considerando tanto a pertinência das respostas apresentadas quanto a análise de todo o processo desenvolvido, observando os conhecimentos conceituais, procedimentais e atitudinais construídos ao longo da sequência de ensino (Freitas, 2022).

Neste sentido, a partir das discussões trazidas pelos pesquisadores que embasaram esse breve mapeamento sobre algumas orientações metodológicas para um ensino baseado na RP, Freitas (2022) apresentou uma atualização da sequência metodológica contemplando de forma geral os aspectos levantados pelos autores citados, a fim de propiciar ao professor um direcionamento para construção de seus planos de ensino e a implementação desta abordagem em sala de aula.

As etapas metodológicas foram construídas com bases nos objetivos específicos deste trabalho de pesquisa. Também, a elaboração da sequência de ensino e aprendizagem segue as etapas que envolvem a metodologia de ensino por resolução de problemas, sistematizadas em Freitas (2022), na Figura 16 a seguir:

Figura 16 - Etapas da sequência de ensino e aprendizagem fundamentadas na resolução de problemas.



Fonte: Freitas (2022).

Vale ressaltar que, considerando o losango didático de Mehéut e Psillos (2004) e as etapas da metodologia de ensino por Resolução de Problemas descritas na figura 16, observa-se que em todas elas podemos encontrar as dimensões epistemológicas e pedagógicas, tendo a predominância de cada uma delas em determinadas etapas.

3.4 ELABORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

Buscando analisar os conhecimentos prévios dos estudantes da 3º série do Ensino Médio, participantes da pesquisa, sobre conceitos e aplicações da fissão e fusão nuclear, foi apresentado o problema proposto, elaborado para a sequência de ensino e aprendizagem, baseado nas características de um problema eficaz estabelecido por Ribeiro *et al.*, (2020).

Quadro 3 - Problemas proposto para analisar os conhecimentos prévios dos estudantes.

De acordo com artigo publicado na BBC News em 24 de janeiro de 2024, o “Relógio do Juízo Final”, que mostra quão simbolicamente próximo o mundo estaria de um apocalipse, vai seguir marcando 90 segundos para meia-noite – mesmo horário do ano passado. Os cientistas responsáveis pelo projeto listaram os motivos pelos quais os ponteiros seguem perto do “Dia do Juízo Final”. Ameaças de uma nova corrida armamentista nuclear, a guerra da Ucrânia e as preocupações com as mudanças climáticas são os principais fatores, segundo eles... desde 2007, os cientistas têm considerado os impactos de novos riscos provocados pelo homem, como inteligência artificial (IA) e as mudanças climáticas, além da maior ameaça de todas: a guerra nuclear. Acredita-se que possibilidade de uma guerra nuclear é iminente e pode causar desastres irrecuperáveis para o planeta e a população, transcendendo fronteiras e gerações, visto que uma análise crítica dessas tecnologias revela um cenário complexo, permeado por considerações éticas, políticas e sociais. Diante dessa problemática de ameaça armamentista nuclear, você é desafiado a investigar os processos físicos e químicos que ocorrem nas bombas nucleares com o objetivo de relatar, através de uma carta para sua geração e para as gerações futuras, que desconhecem esta temática, aspectos relevantes destes processos, como a descrição desses mecanismos, os benefícios, as ameaças e possibilidades futuras. Dessa forma, para escrever a carta com a problemática em questão, segue alguns questionamentos que devem ser levados em consideração: Quais os processos que acontecem nas bombas nucleares? (descreva-os através de textos e desenhos). Esses processos são princípios exclusivos das bombas nucleares ou podemos verificar em outras aplicações? Quais os riscos e benefícios e possibilidades futuras das aplicações destes processos?

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A rubrica de avaliação para este problema proposto foi elaborada através das proposições de Fernandes (2021) que inclui 4 elementos: a) a descrição geral da tarefa que é objeto de avaliação; b) os critérios; c) os níveis de descrição do desempenho relativamente a cada critério; e d) a definição de uma escala em que a cada numeral, letra do alfabeto ou percentagem, corresponde um determinado

indicador ou descritor de desempenho. O Quadro 4 descreve a rubrica de avaliação elaborada para analisar o problema proposto.

Quadro 4 - Rubrica de avaliação para a avaliação diagnóstica.

Desempenho na Resolução do Problema			
Critérios	Níveis de Desempenho		
	Insatisfatório	Parcialmente Satisfatório	Satisfatório
Fenomenológico	A resposta não apresenta contextualização das aplicações da radioatividade com o cotidiano.	A resposta apresenta alguma compreensão do objeto de conhecimento, mas a contextualização com o cotidiano é limitada, superficial.	A resposta demonstra compreensão do objeto de conhecimento, com contextualização clara e relevante com o cotidiano.
Teórico	A resposta demonstra uma compreensão inadequada dos processos de fissão e fusão nuclear, sem a correta aplicação dos conceitos do nível submicroscópico (núcleos atômicos, prótons, nêutrons). Não há explicação sobre a divisão de núcleos pesados (fissão) ou a fusão de núcleos leves.	A resposta apresenta uma compreensão básica dos conceitos referentes às dimensões microscópicas envolvidos na fissão e fusão nuclear, como descrição dos elementos, átomos, partículas e processos na quebra do núcleo atômico na fissão e na junção de núcleos na fusão, embora de maneira superficial.	A resposta demonstra uma compreensão clara e detalhada dos conceitos de fissão e fusão nuclear, abordando a separação de núcleos pesados e a junção de núcleos leves. Explica de forma precisa o papel dos elementos, átomos e outras partículas nos processos nucleares. Além disso, inclui uma explicação adequada da dimensão submicroscópica, mostrando uma visão aprofundada da temática.
Representacional	As respostas demonstram uma compreensão limitada dos processos de fissão e fusão nuclear através de representações visuais. Os diagramas, gráficos e equações utilizadas são inadequados, apresentando erros significativos na representação dos conceitos nucleares.	As respostas mostram algum grau de compreensão dos processos de fissão e fusão nuclear através de representações visuais. Os diagramas, gráficos e equações são utilizados, mas com algumas imprecisões ou omissões que afetam a clareza e a eficácia da construção do conhecimento. Embora haja uma tentativa de alinhar as representações com as proposições teóricas, a	As respostas mostram demonstram uma compreensão clara e detalhada dos processos de fissão e fusão nuclear através de representações visuais bem elaboradas. Os diagramas, gráficos e equações são utilizados de forma precisa e coerente, refletindo com exatidão as proposições teóricas. A representação dos processos nucleares é

		<p>conexão entre os modelos apresentados e os conceitos teóricos não é totalmente consistente, resultando em uma compreensão limitada do fenômeno.</p>	<p>detalhada e eficaz para compreensão dos fenômenos de fissão e fusão.</p>
--	--	--	---

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Fernandes (2021).

Na construção da rubrica de avaliação, os critérios foram estabelecidos com base nos níveis de conhecimento químico propostos por Machado (1999), os quais visam à compreensão dos estudantes acerca dos níveis fenomenológico, teórico e representacional.

A análise de todas as respostas da avaliação diagnóstica encontra-se no Apêndice A.

3.5 CONSTRUÇÃO DA SEQUÊNCIA DE ENSINO E APRENDIZAGEM BASEADA NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Foi elaborada uma sequência de ensino e aprendizagem fundamentada nas discussões de Silva e Martha (2018) sobre o processo de ensino-aprendizagem e na metodologia de ensino por resolução de problemas. Os diálogos estabelecidos pelos estudantes foram registrados no diário de bordo do professor, de modo a possibilitar, posteriormente, a ampliação da análise e discussão dos resultados, com maior riqueza de informações oriundas dos dados da pesquisa.

Etapa 1. Avaliação Diagnóstica

Nesta sequência de ensino e aprendizagem foi construído um problema, Quadro 5, com base nas características de um problema eficaz estabelecidos por Ribeiro *et al.*, (2020).

Quadro 5 - Problema proposto baseado nas características de um problema eficaz.

<p>1) um problema eficaz contextualiza a temática à realidade do estudante e aproxima da questão proposta.</p>	<p>De acordo com artigo publicado na BBC News em 24 de janeiro de 2024, o “Relógio do Juízo Final”, que mostra quão simbolicamente próximo o mundo estaria de um apocalipse, vai seguir marcando 90 segundos para meia-noite – mesmo horário do ano passado. Os cientistas responsáveis pelo projeto listaram os motivos pelos quais os ponteiros seguem perto do “Dia do Juízo Final”. Ameaçam de uma nova corrida armamentista nuclear, a guerra da Ucrânia e as preocupações com as mudanças climáticas são os principais fatores, segundo eles... desde 2007, os cientistas têm considerado os impactos de novos riscos provocados pelo homem, como inteligência artificial (IA) e as mudanças climáticas, além da maior ameaça de todas: a guerra nuclear. Acredita-se que possibilidade de uma guerra nuclear é iminente e pode causar desastres irrecuperáveis para o planeta e a população, transcendendo fronteiras e gerações, visto que uma análise crítica dessas tecnologias revela um cenário complexo, permeado por considerações éticas, políticas e sociais. Diante dessa problemática de ameaça armamentista nuclear, você é desafiado a investigar os processos físicos e químicos que ocorrem nas bombas nucleares com o objetivo de relatar, através de uma carta para sua geração e para as gerações futuras, que desconhecem esta temática, aspectos relevantes destes processos, como a descrição desses mecanismos, os benefícios, as ameaças e possibilidades futuras. Dessa forma, para escrever a carta com a problemática em questão, segue alguns questionamentos que devem ser levados em consideração: Quais os processos que acontecem nas bombas nucleares? (descreva-os através de textos e desenhos). Esses processos são princípios exclusivos das bombas nucleares ou podemos verificar em outras aplicações? Quais os riscos e benefícios e possibilidades futuras das aplicações destes processos?</p>	<p>2) suscita a reflexão crítica acerca do assunto abordado.</p>
<p>3) motiva o estudante a buscar soluções.</p>		<p>4) favorece a proposição de hipóteses, pesquisas, investigação, questionamentos, discussões, levando a uma tomada de decisão.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Etapa 2. Discussões e reflexões dos estudantes para o problema proposto

Nesta fase, os estudantes foram organizados em grupos de cinco integrantes para realizar a análise crítica e a discussão do problema proposto. Durante essa etapa, os alunos focaram na identificação de pontos-chave e na elaboração de possíveis questionamentos para reflexão aprofundada. Essa etapa foi conduzida em uma aula com duração de 50 minutos, buscando proporcionar um ambiente colaborativo que estimulava o pensamento crítico e a interação entre os participantes.

Etapa 3. Pesquisa bibliográfica

Com base nas discussões e reflexões conduzidas na etapa dois desta sequência de ensino e aprendizagem, os estudantes, sob a orientação do professor, realizaram pesquisas em artigos e livros que abordavam as temáticas de radioatividade, fissão e fusão nuclear. Nesse momento, os alunos buscaram possíveis respostas para os questionamentos levantados na etapa anterior, aprofundando sua compreensão dos temas propostos. Para auxiliar na pesquisa, o professor recomendou o uso de fontes confiáveis que foram apresentados por meio de links para facilitar o acesso direto dos estudantes.

Com o intuito de garantir a confiabilidade das informações acessadas, foram previamente selecionados três links de sites com conteúdo adequado ao tema proposto. Essa seleção prévia foi realizada pelo professor, considerando a necessidade de assegurar fontes fidedignas, evitando o uso de materiais de procedência duvidosa. Como medida preventiva, frente à possibilidade de instabilidade de conexão com a internet ou indisponibilidade temporária das páginas eletrônicas, o professor optou por disponibilizar versões impressas dos materiais selecionados, assegurando, assim, a plena realização da atividade de pesquisa.

A seguir, apresenta-se um quadro com os links dos sites utilizados na etapa de pesquisa bibliográfica.

Quadro 6 - Links para a pesquisa bibliográfica.

Link 1	https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/aplicacoesenergianuclearnasaud.pdf
Link 2	https://edit.sbz.org.br/anexos/radioatividade-meio-ambiente.pdf
Link 3	https://pantheon.ufri.br/bitstream/11422/2908/1/Leonardo%20Raduan%20de%20Felice%20Abeid%20maio04.pdf

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Etapa 4. Aula expositiva e apresentação de vídeos sobre radioatividade, suas aplicabilidades e os processos de fissão e fusão nuclear.

Nesta etapa, desenvolvida em duas aulas de 50 minutos, os estudantes participaram inicialmente de uma aula expositiva, na qual foram abordados os conceitos fundamentais e as diversas aplicações da radioatividade. Em seguida, foram exibidos vídeos que complementaram os temas discutidos, fornecendo uma contextualização visual dos processos de fissão e fusão nuclear.

Os vídeos selecionados para essa atividade são oriundos dos perfis “CURIOSIDADES INSANAS” e “BBC News Brasil” no YouTube, intitulados, respectivamente, “*O que é a Radioatividade? Como ela Funciona?*” (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CGar94Wmzh4>) e “*Como funciona uma bomba nuclear e por que causa tanta destruição?*” (disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=f18W_ITQGa8). Esses recursos audiovisuais têm como objetivo enriquecer a compreensão teórica, proporcionando aos estudantes uma visão mais ampla e aplicada dos tópicos em discussão.

A aula foi finalizada com um debate, durante o qual o professor questionou os estudantes sobre as contribuições desses dois materiais para a resolução do problema inicialmente proposto.

Etapa 5. Atividade com simuladores de processos de fissão e fusão nuclear

Neste momento, que aconteceu em mais uma aula de 50 minutos, foi utilizado o laboratório de informática da escola para realizar uma atividade prática com o uso de simuladores de processos de fissão e fusão nuclear (<https://nuclearsecrecy.com/nukemap/>).

Etapa 6. Atividade lúdica para os estudantes

A turma foi dividida em grupos, diferentes dos selecionados na etapa 2 desta sequência de ensino e aprendizagem, para realizar uma atividade lúdica de perguntas e respostas através do aplicativo *Kahoot*. O objetivo de montar equipes diferentes é auxiliar no compartilhamento dos conhecimentos construídos no seu grupo de origem com outros estudantes de grupos diferentes. A atividade aconteceu em uma aula de 50 minutos.

Etapa 7. Reapresentação do problema.

Após as seis etapas anteriores, o professor reapresentou o problema para a turma e os estudantes, em seus grupos de origem, foram convidados a apresentarem soluções para o problema proposto. Neste momento o professor avaliou as soluções baseado da construção do conhecimento na perspectiva de Machado (1999), que através dos níveis fenomenológico, teórico e representacional busca inter-relações entre mundo-linguagem-pensamento como questão epistemológica básica para a construção do conhecimento nas aulas de Química.

3.6 AVALIAÇÃO DAS ETAPAS METODOLÓGICAS E DA SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA

A avaliação da sequência de ensino e aprendizagem, realizada por meio da resolução de problemas, foi conduzida de forma processual e baseada nas diferentes etapas do processo. Inicialmente, foi avaliada a habilidade dos alunos em identificar pontos-chave e levantar questionamentos relevantes, incentivando a reflexão crítica e o trabalho colaborativo, especialmente no que diz respeito à compreensão teórica dos processos nucleares. A seguir, o foco foi a capacidade dos alunos de sintetizar informações complexas, utilizando fontes de qualidade e demonstrando clareza e precisão na interpretação dos conteúdos teóricos.

Ao longo do processo, também foi realizada uma avaliação formativa, com ênfase na assimilação dos conceitos teóricos e na habilidade de relacionar esses conceitos com representações simbólicas durante os debates. Além disso, o desempenho dos alunos foi avaliado em atividades práticas, como simulações, onde

a tradução do conhecimento teórico em ações práticas é central. A última etapa da avaliação considerou a agilidade, precisão e engajamento dos alunos com o conteúdo, fornecendo um retorno imediato sobre seu progresso.

Por fim, a partir da solução final ao problema proposto, a avaliação foi conduzida com base em uma rubrica, cujos critérios foram definidos segundo os níveis de conhecimento químico de Machado (1999), que abrangem os aspectos fenomenológicos, teóricos e representacionais. A análise da aprendizagem dos estudantes foi realizada a partir das descrições que eles apresentam sobre esses níveis, fundamentadas nas compreensões teóricas delineadas por Okuno (2018), Cardoso (2012), Cacelotti e Marques (2023), Martins (1990), Damásio e Tavares (2010) e Tavares (2019). Seguem os quadros que avaliarão as etapas metodológicas e a resposta para o problema proposto.

Quadro 7 - Rubricas de avaliação das etapas da sequência de ensino e aprendizagem.

Desempenho nas Etapas Metodológicas			
Critérios	Níveis de Desempenho		
	Insatisfatório	Parcialmente Satisfatório	Satisfatório
Etapa 2 Teórico Será avaliada a habilidade dos alunos em identificar pontos-chave e levantar questionamentos relevantes, incentivando uma reflexão crítica.	O estudante apresenta dificuldades em estabelecer associações entre os conteúdos apresentados e o aspecto teórico da aprendizagem de conceitos científicos.	O estudante demonstra uma assimilação parcial dos conteúdos, apresentando progresso, mas ainda com dificuldades em estabelecer conexões completas com o aspecto teórico.	O estudante demonstra uma compreensão sólida e completa dos conteúdos, sendo capaz de associar o aspecto teórico, de forma coerente e satisfatória.
Etapa 3 Teórico A avaliação terá foco na capacidade de sintetizar informações complexas e na qualidade das fontes selecionadas. Serão valorizadas a clareza e precisão na interpretação teórica dos conteúdos.	O estudante apresenta dificuldades em estabelecer associações entre os conteúdos apresentados e o aspecto teórico da aprendizagem de conceitos científicos.	O estudante demonstra uma assimilação parcial dos conteúdos, apresentando progresso, mas ainda com dificuldades em estabelecer conexões completas com o aspecto teórico.	O estudante demonstra uma compreensão sólida e completa dos conteúdos, sendo capaz de associar o aspecto teórico, de forma clara e precisa.
Etapa 4	O estudante apresenta dificuldades em	O estudante demonstra uma	O estudante demonstra uma

Teórico e Representacional Durante o debate será feita uma avaliação formativa para verificar a compreensão dos alunos. A atenção será voltada à assimilação dos conceitos teóricos e sua capacidade de relacionar esses conceitos com as representações do mecanismo da reação em cadeia.	estabelecer associações entre os conteúdos apresentados e os aspectos teóricos e representacionais da aprendizagem de conceitos científicos.	assimilação parcial dos conteúdos, apresentando progresso, mas ainda com dificuldades em estabelecer conexões completas com os aspectos teóricos e representacionais.	compreensão sólida e completa dos conteúdos, sendo capaz de associar os aspectos teóricos e representacionais, de forma coerente e satisfatória.
Etapa 5 Fenomenológico A avaliação incluirá o desempenho na simulação dos processos e na aplicação de conceitos teóricos em um ambiente interativo. A capacidade de traduzir o conhecimento teórico em ações práticas será central nesse momento.	O estudante apresenta dificuldades em estabelecer associações entre os conteúdos apresentados e o aspecto fenomenológico da aprendizagem de conceitos científicos.	O estudante demonstra uma assimilação parcial dos conteúdos, apresentando progresso, mas ainda com dificuldades em estabelecer conexões completas com o aspecto fenomenológico.	O estudante demonstra uma compreensão sólida e completa dos conteúdos, sendo capaz de associar o aspecto fenomenológico, de forma coerente e satisfatória.
Etapa 6 Fenomenológico, Teórico e Representacional A avaliação será baseada na agilidade de resposta, na precisão das respostas e no engajamento dos alunos com o conteúdo, permitindo um retorno imediato sobre seu desempenho.	O estudante apresenta dificuldades em estabelecer associações entre os conteúdos apresentados e os três principais aspectos da aprendizagem de conceitos científicos	O estudante demonstra uma assimilação parcial dos conteúdos, apresentando progresso em algumas áreas, mas ainda com dificuldades em estabelecer conexões completas entre os aspectos teóricos, representacionais e fenomenológicos	O estudante demonstra uma compreensão sólida e completa dos conteúdos, sendo capaz de associar os aspectos teóricos, representacionais e fenomenológicos de forma coerente e satisfatória.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Fernandes (2021).

A mesma rubrica será utilizada tanto para a avaliação diagnóstica quanto para a solução do problema proposto pelos estudantes após as etapas metodológicas, com o objetivo de proporcionar coerência e clareza nos critérios de avaliação (Quadro 4). Essa abordagem facilita a comparação entre o desempenho inicial e final,

evidenciando o progresso ao longo do processo de ensino-aprendizagem. Além disso, assegura que os estudantes compreendam as expectativas desde o início, direcionando seus esforços para atender aos critérios estabelecidos e resultando em um aprendizado mais eficiente.

3.7 PRODUTO EDUCACIONAL

Os *e-books* são notáveis por sua flexibilidade, alcance global, interatividade e eficiência, consolidando-se como uma opção não apenas viável, mas também econômica e sustentável para os leitores em um cenário cada vez mais digital. Ao desempenhar um papel crucial no processo educativo, destacamos que o produto educacional desenvolvido para esta pesquisa foi um *e-book*. Este material abordou uma sequência de ensino e aprendizagem baseado na metodologia de ensino por resolução de problemas, buscando oferecer praticidade, motivação e um ambiente de ensino mais dinâmico e envolvente para os professores. A escolha do formato digital não apenas abraça a contemporaneidade, mas também se alinha com os princípios de eficácia, acessibilidade global e sustentabilidade, características fundamentais na Educação do século XXI. Neste sentido, destacamos como objetivo específico deste trabalho de pesquisa, a elaboração de um produto educacional sobre a sequência de ensino e aprendizagem baseado na metodologia de ensino por resolução de problemas relacionado a temática fissão e fusão nuclear em formato de *e-book* (Apêndice B).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ETAPA 1 – AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

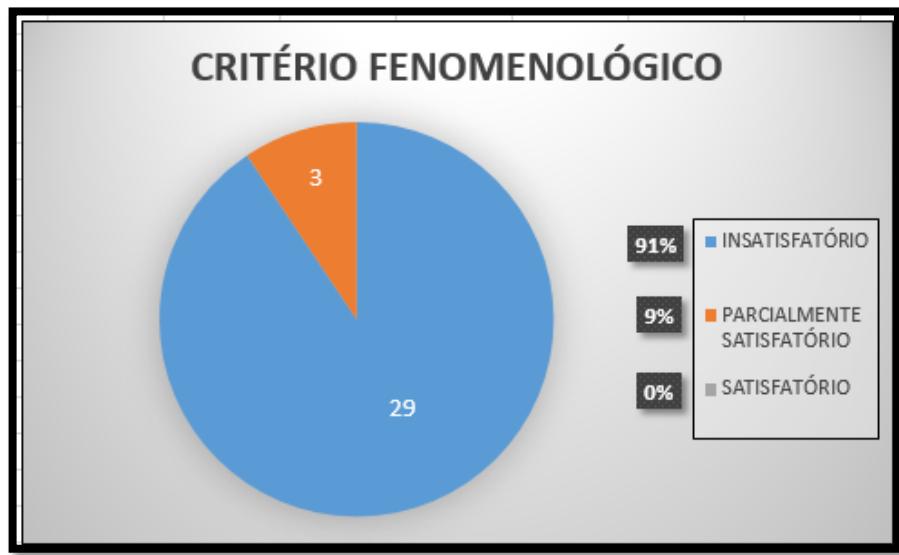
Na primeira etapa desta sequência didática, foi aplicada uma avaliação diagnóstica com o objetivo de identificar e analisar os conhecimentos prévios dos(as) estudantes participantes da pesquisa. O instrumento utilizado para essa avaliação consistiu no próprio problema proposto como ponto de partida da sequência didática. É importante destacar que este representou o primeiro contato da turma com o objeto de conhecimento, uma vez que, até aquele momento, os(as) estudantes ainda não haviam estudado a temática *radioatividade* nem trabalhado a habilidade correspondente.

Nessa fase inicial, participaram 32 estudantes, identificados na pesquisa pelas siglas E.1 a E.32, que resolveram individualmente a situação-problema apresentada. O professor realizou a leitura do enunciado em conjunto com a turma e, sem fornecer informações adicionais, solicitou que os(as) estudantes respondessem conforme as orientações contidas no problema.

Os gráficos apresentados a seguir ilustram os resultados obtidos a partir da aplicação de uma rubrica de desempenho elaborada com base em critérios construídos segundo os níveis de conhecimento químico propostos por Machado (1999), os quais abrangem os níveis fenomenológico, teórico e representacional, visando à análise da compreensão conceitual dos(as) estudantes.

A Figura 17 apresenta o desempenho dos estudantes em relação ao nível fenomenológico do conhecimento sobre radioatividade:

Figura 17 - Gráfico de respostas para o nível fenomenológico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dos 32 instrumentos analisados, 29 apresentaram desempenho insatisfatório no critério fenomenológico, isto é, na habilidade de articular o conhecimento científico com situações do cotidiano, criando sentido contextual para a radioatividade. Embora grande parte das respostas mencionasse a existência de bombas nucleares – objeto diretamente referenciado no problema diagnóstico – apenas três (E.18, E.19 e E.24) foram consideradas parcialmente satisfatórias, e mesmo essas evidenciaram uma articulação conceitual muito limitada entre tal artefato bélico e os mecanismos de fissão ou fusão nuclear.

A Figura 18 reúne as respostas dos três estudantes avaliadas como parcialmente satisfatórias.

Figura 18 - Respostas dos estudantes E.18, E.19 e E.24, respectivamente

NÃO TENHO CONHECIMENTO, MAS SEI DOS RISCO QUE PODE ACONTECER COMO RADIAÇÃO, EFEITOS AMBIENTAIS E ETC. PORQUE EXISTE UM PROCESSO QUE SE NÃO ESTOU ENGAÑADA É FISSÃO NUCLEAR. NÃO LEMBRO O QUE SEJA, MAS SE QUE FAZ PARTE DO PROCESSO.

uma bomba funicular através de um processo chamado "fissão nuclear". Isso acontece quando o núcleo de um átomo perde, como urânia.

O processo que acontece na bomba nuclear é a fusão nuclear.

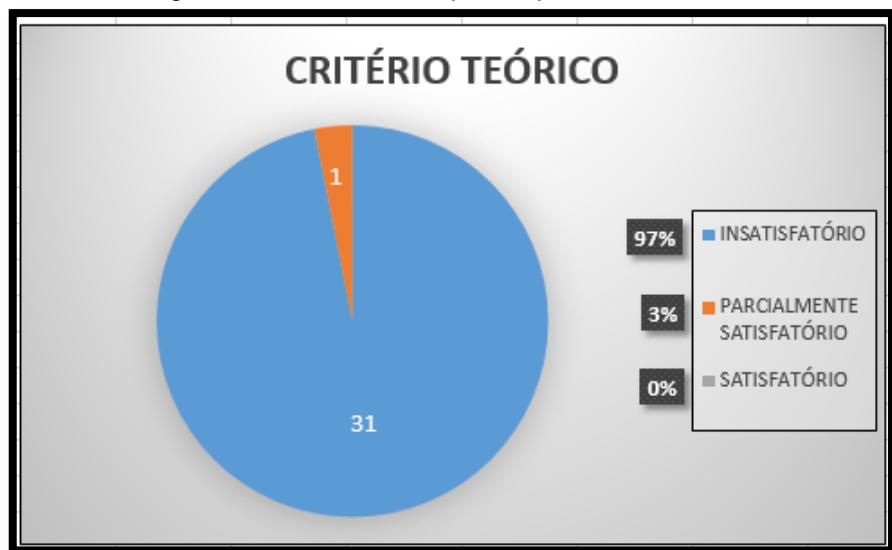
Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Nas produções de E.18 e E.19 foi reconhecida a fissão nuclear como princípio subjacente às bombas nucleares, ao passo que E.24 associou-as ao processo de fusão. Em comum, os três estudantes estabeleceram um elo inicial entre fenômeno tecnológico e o objeto de conhecimento, porém sem avançar para outras aplicações, benefícios ou riscos desses processos. De igual modo, durante a aplicação da avaliação diagnóstica observaram-se interações informais entre colegas; todavia, tais trocas não sinalizaram elaboração coletiva que ampliasse a dimensão contextual do tema.

Segundo Machado (1999) as propostas de ensino desconsideram a inter-relação entre os fatos químicos e sua inserção e funcionamento no mundo, e que para a formação do pensamento químico seria importante uma tensão entre conceito e contexto. Os resultados aqui apresentados reiteram tal diagnóstico: persiste uma lacuna na capacidade dos/as estudantes de relacionar o contexto problematizador – as bombas nucleares – com os conceitos de radioatividade, particularmente os processos de fissão e fusão, assim como com impactos sociais, ambientais ou tecnológicos decorrentes do uso da energia nuclear.

A Figura 19 apresenta os resultados relacionados ao nível teórico do conhecimento químico sobre radioatividade:

Figura 19 - Gráfico de respostas para o nível teórico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao analisarmos o nível teórico de conhecimento químico, constatamos que apenas um participante, o estudante E.19, alcançou desempenho classificado como parcialmente satisfatório. Ainda assim, sua argumentação permanece simples e incompleta. Reproduzimos a seguir a resposta do estudante E.19:

Figura 20 - Resposta do estudante E.19.

uma átomo fumava através de um professor chamado "fumaço nuclear". Isso acontece quando o núcleo de um átomo pesado, como urânia.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

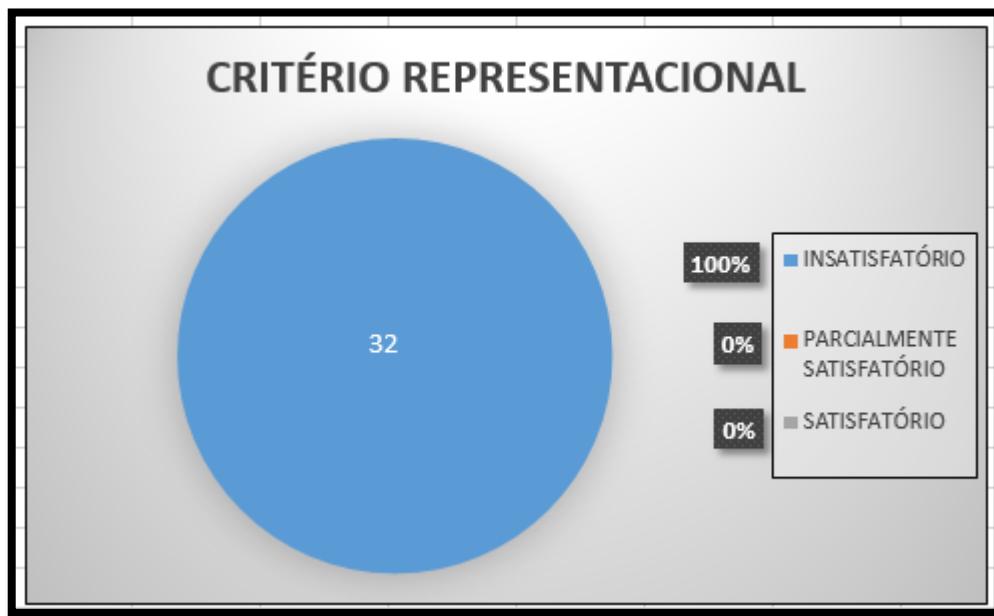
Os aspectos teóricos associam-se às dimensões submicroscópicas que incluem os átomos, as moléculas, os íons, os elétrons etc. (Machado, 1999). À primeira vista, o estudante demonstra reconhecer que explicações em nível microscópico são indispensáveis para compreender fenômenos nucleares. Ao citar especificamente o “núcleo de um átomo pesado” e exemplificar com o urânio, E.19

consegue relacionar conceitos fundamentais ao processo de fissão nuclear — conexão essa coerente com o que a rubrica classifica parcialmente satisfatória. No entanto, a elaboração termina aí. Faltando elementos que impedem que a resposta atinja o patamar satisfatório.

No que se refere ao contexto interativo da atividade, registrou-se pouca comunicação entre os estudantes durante a avaliação diagnóstica. Tanto diálogos espontâneos quanto trocas de apontamentos foram raros e, nas poucas conversas captadas, não houve qualquer referência explícita aos aspectos teóricos exigidos. Esse silêncio pode indicar que os estudantes ainda não dominavam os fundamentos submicroscópicos da temática proposta, reforçando a necessidade de intervenções didáticas que estimulem a socialização de ideias conceituais.

A Figura 21 apresenta as respostas dos estudantes analisados em relação ao nível representacional do conhecimento químico

Figura 21 - Gráfico de respostas para o nível representacional.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

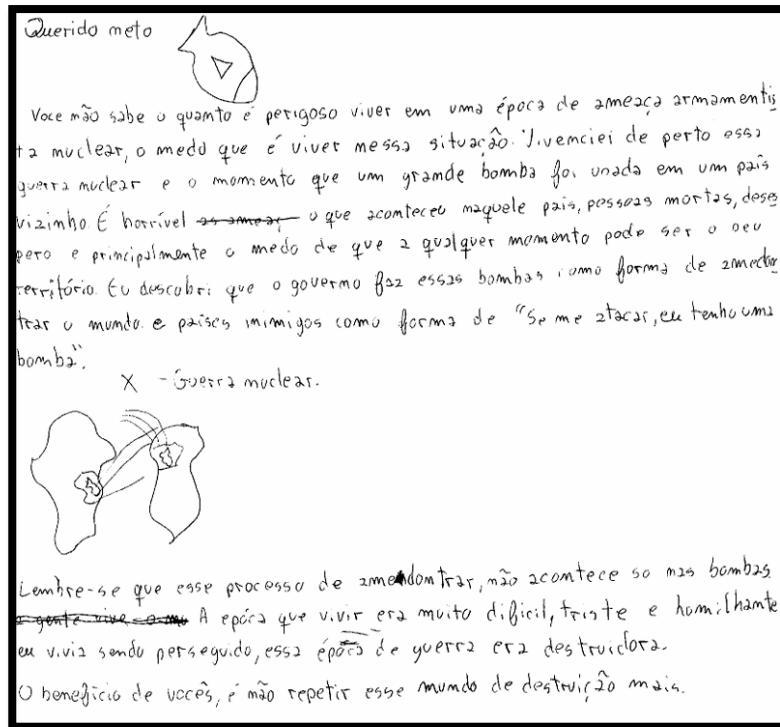
Conforme evidenciado no gráfico, todos os estudantes apresentaram desempenho insatisfatório em relação ao critério representacional, de acordo com os parâmetros estabelecidos na rubrica de avaliação. Esse resultado já era esperado, visto que, até o momento da aplicação desta pesquisa, os estudantes ainda não haviam sido introduzidos ao objeto de conhecimento referente à radioatividade. Segundo Machado (1999), o aspecto representacional diz respeito à natureza

simbólica dos conteúdos químicos, abrangendo a linguagem própria da Química — como fórmulas, equações e demais símbolos — que permitem a representação dos fenômenos em diferentes níveis de compreensão.

A análise das respostas dos estudantes mostra que nenhuma delas foi classificada como parcialmente satisfatória ou satisfatória. Embora alguns estudantes tenham realizado desenhos, essas representações limitaram-se a imagens genéricas de bombas ou a elementos visuais associados a conflitos nucleares, sem qualquer relação direta com os conceitos científicos de fissão e fusão nuclear. Não foram observadas representações que demonstrassem o entendimento dos processos nucleares nem o uso de simbologias específicas da área.

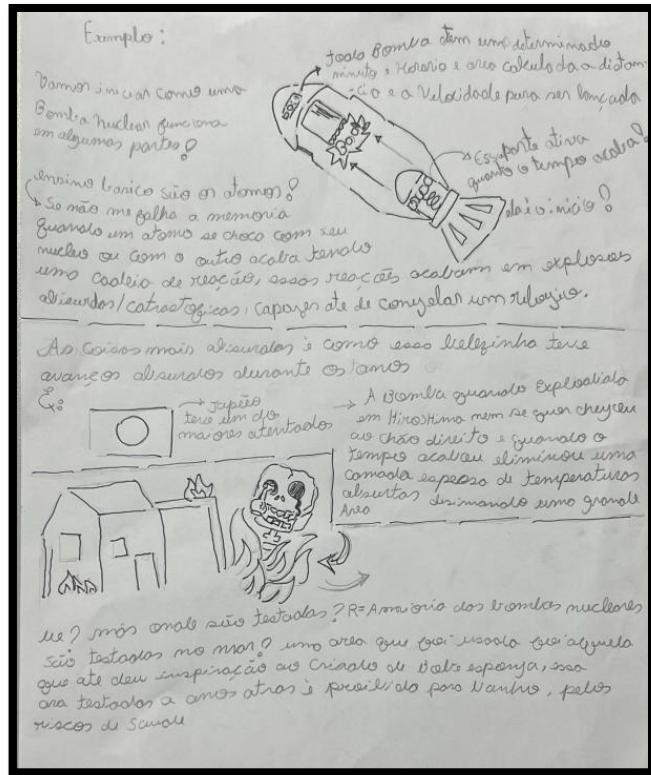
Os desenhos produzidos pelos estudantes E.5 e E.7, apresentados a seguir, ilustram essa limitação:

Figura 22 - Imagem da resposta do estudante E.5.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Figura 23 - Resposta do grupo G.1 para a segunda etapa.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Essas respostas não contemplam os elementos simbólicos esperados para o objeto de conhecimento em questão, revelando um distanciamento entre a atividade proposta e a apropriação dos códigos representacionais próprios da linguagem química. De acordo com os critérios da rubrica, portanto, todas as 32 respostas foram classificadas no nível insatisfatório quanto ao nível representacional do conhecimento químico. A análise de todas as respostas da avaliação diagnóstica encontra-se no Apêndice A.

4.2. ANÁLISE DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA - ETAPAS 2 A 6

A rubrica elaborada para a parte da sequência didática que compreende as etapas 2 a 6 foi concebida com o objetivo de avaliar os diferentes aspectos do conhecimento químico mobilizados em cada uma dessas fases. Para tanto, foi construída uma rubrica específica para cada etapa, considerando os níveis de representação do conhecimento químico propostos por Machado (1999), a saber: fenomenológico, teórico e representacional.

Além disso, os dados da pesquisa foram registrados em um diário de bordo (caderno de anotações), no qual, enquanto os debates eram realizados, o professor registrava as principais observações referentes aos trechos em que se evidenciavam os processos e mobilizações do conhecimento nas etapas da sequência didática.

Dessa forma, embora cada etapa envolva, em algum grau, os três níveis do conhecimento químico, a rubrica foi organizada para avaliar apenas os níveis que são realmente esperados em cada momento da sequência didática. Essa escolha respeita os objetivos de aprendizagem de cada atividade e o nível de dificuldade adequado a ela. Com essa organização, foi possível realizar uma análise mais clara e detalhada do desempenho dos estudantes.

A segunda etapa da sequência didática teve como foco a análise dos critérios teóricos relacionados às respostas dadas e debates entre os grupos. A rubrica de avaliação utilizada neste momento foi elaborada com o objetivo de verificar a habilidade dos(as) estudantes em identificar pontos-chave no problema proposto, bem como em levantar questionamentos relevantes que indicassem uma postura reflexiva e crítica diante do conteúdo. Além disso, buscou-se avaliar a capacidade de trabalho colaborativo e de articulação lógica das ideias, especialmente no que diz respeito à compreensão teórica dos processos nucleares.

Cabe destacar que alguns estudantes que haviam se ausentado na etapa anterior (avaliação diagnóstica) permaneceram sem participar desta atividade, ainda que o professor tenha reafirmado a possibilidade de sua integração ao processo. Dos 32 estudantes que participaram da primeira etapa, apenas 20 deram continuidade às atividades. Os demais alegaram necessidade de dedicação às tarefas vinculadas à Semana da Matemática, projeto institucional em andamento na escola. Considerando o caráter voluntário da participação nas etapas desta pesquisa, conforme acordado desde o início da proposta, o docente respeitou a decisão dos(as) estudantes e prosseguiu com o grupo que demonstrou interesse em aprofundar os conhecimentos.

Visando promover uma melhor interação entre os(as) participantes, a atividade foi transferida para o refeitório da escola, ambiente mais amplo e propício ao trabalho em equipe. A organização dos grupos foi realizada de forma aleatória, com o intuito de evitar agrupamentos por afinidade ou proximidade pessoal, o que poderia limitar a diversidade de contribuições. Assim, formaram-se cinco grupos compostos por quatro integrantes cada.

Aos grupos foi entregue uma folha, e solicitou-se que, a partir da leitura do problema proposto e das reflexões realizadas em grupo, os(as) estudantes discutissem suas percepções e compartilhassem ideias que pudessem ampliar ou aprimorar as respostas anteriormente formuladas. Essa etapa teve como foco estimular o diálogo e a escuta ativa entre os pares, favorecendo a construção coletiva do conhecimento.

Posteriormente, cada grupo deveria registrar, na folha fornecida, um conjunto de palavras-chave que julgassem úteis para nortear uma futura pesquisa voltada à resolução do problema. A atividade também incluía a formulação de questionamentos que surgissem durante o debate, de forma que esses questionamentos servissem como guias investigativos, ampliando as possibilidades de aprofundamento conceitual e de elaboração de respostas mais fundamentadas.

A seguir, são apresentadas as imagens contendo as respostas elaboradas pelos grupos durante esta etapa da sequência didática.

Figura 24 - Resposta do grupo G.1 para a segunda etapa.

palavras-chave - Amostragem Nuclear, mudanças climáticas, inteligência artificial

1 - Explosão da bomba com utilização de avião, o avião para de realizar onde a bomba vai ser estourada, a explosão da bomba no local ao ser jogada, a mudanças que ela é jogada vai estourar a uma alta temperatura e ao se aproximar um distâncias mínima de onde ela explodir.

2 - Não são exclusivas só tem na bagunça.

3 - Tudo.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Figura 25 - Resposta do grupo G.2 para a segunda etapa.

Retorno Resumo
 ↓
 ameaça armamentista
 tempo de exploração
 quebra de Partícula
 Reações químicas
 Relações de Albert Einstein com a bomba atômica.
 Palavras-chave:
 química
 exploração
 destruição
 ameaça
 iminência
 iminente
 guerra
 política
 Ucrânia
 Rússia
 Oppenheimer
 Albert Einstein
 Hiroshima
 Nagasaki
 little boy

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

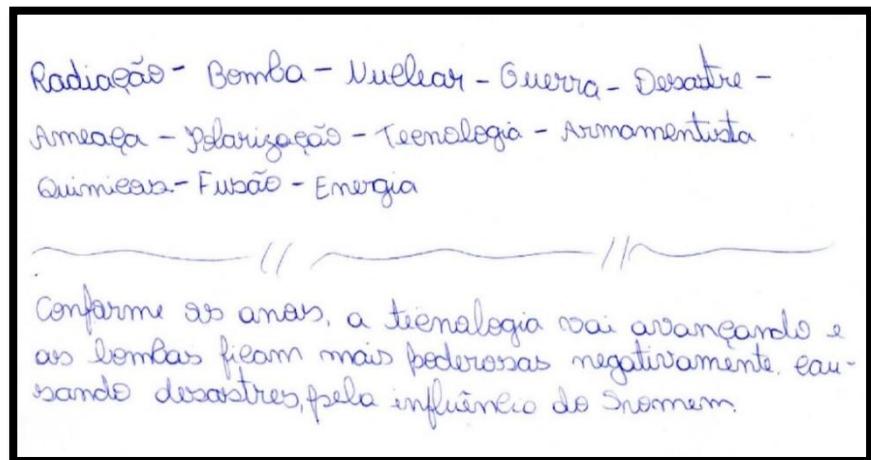
Figura 26 - Resposta do grupo G.3 para a segunda etapa.

PALAVRAS-CHAVE

"Bomba atômica"
 "Universo"
 "América"
 "NUCLEAR"
 "Plutônio"
 "Composto"
 "Química"
 "Anomais"
 "NUCLEAR"

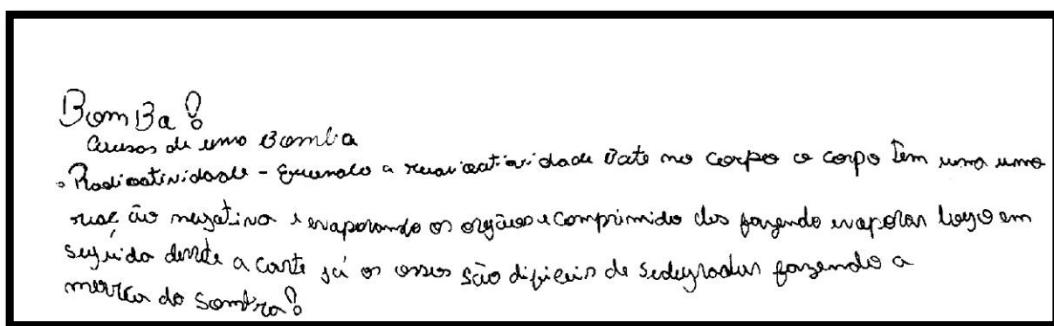
Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Figura 27 - Resposta do grupo G.4 para a segunda etapa.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Figura 28 - Resposta do grupo G.5 para a segunda etapa.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Os grupos demonstraram dificuldade significativa em estabelecer conexões, mesmo que parciais, entre os elementos do problema proposto e os conteúdos teóricos sobre radioatividade. Vale ressaltar que os estudantes, até esta sequência de ensino e aprendizagem, ainda não haviam estudado esse objeto de conhecimento. Durante os momentos de debate entre os integrantes desses grupos, não foram observadas menções explícitas ou implícitas, como os processos de fissão e fusão nuclear ou qualquer outro aspecto teórico referente às bombas atômicas, o que evidencia, até o momento, uma lacuna na assimilação e na mobilização do conhecimento químico necessário para a resolução da situação-problema. Ressalta-se que essa dificuldade se relaciona também ao fato de ter sido o primeiro contato dos(as) estudantes com o objeto de conhecimento, uma vez que, até então, a temática radioatividade não havia sido trabalhada com a turma, nem a habilidade correspondente havia sido explorada no contexto pedagógico.

Os grupos G.3 e G.4 incluíram em suas respostas termos relevantes como “urânio”, “plutônio”, “fusão” e “energia”, tais menções ainda se mostraram pontuais e desconectadas de uma compreensão conceitual mais aprofundada. No caso do grupo G.3, a referência ao urânio e ao plutônio foi feita por apenas um estudante, que afirmou: “eu sei que as substâncias das bombas são urânio e plutônio”. Essa fala, embora revele uma confusão entre os conceitos de elementos químicos e substâncias, ou até mesmo de combustíveis, demonstra uma tentativa de articular o problema, mesmo que de forma imprecisa. Ainda que o restante do grupo tenha demonstrado dúvidas quanto à afirmação do colega, o registro dessas palavras como parte das palavras-chave na atividade indica um potencial para direcionamento em futuras pesquisas ou atividades investigativas que ajudaram na busca e resolução do problema.

O grupo G.4, embora não tenha mencionado explicitamente a expressão “fusão nuclear”, demonstrou um movimento importante no campo da construção conceitual durante os debates realizados e registrados no diário de bordo do professor. Um dos integrantes do grupo trouxe o termo “fusão” para a discussão, o que motivou os colegas a refletirem coletivamente sobre o significado do conceito. Em determinado momento, um dos estudantes afirmou: “É quando duas coisas se juntam e formam outra”. Embora essa definição ainda se mostre bastante genérica e superficial do ponto de vista científico, ela representa uma tentativa inicial de atribuição de significado ao termo, revelando indícios de raciocínio analógico e uma predisposição para a compreensão do fenômeno.

Esse tipo de manifestação, ainda que pequena, é relevante do ponto de vista da aprendizagem significativa, pois sinaliza que o grupo começou a construir uma base conceitual que poderá ser aprofundada com intervenções pedagógicas adequadas. A ausência da palavra “nuclear” não invalida o mérito do debate, que já indicava a emergência de ideias que se aproximam da temática proposta, mostrando-se promissor para o desenvolvimento posterior de uma compreensão mais estruturada sobre os processos de fusão nuclear.

Dessa forma, conclui-se que, nesta etapa da sequência didática, a maioria dos grupos apresentou dificuldades em mobilizar os conhecimentos teóricos esperados. No entanto, as manifestações pontuais observadas nos grupos G.3 e G.4 sinalizavam possibilidades de avanço na aprendizagem, especialmente se houvesse incentivo à pesquisa orientada e continuidade nas atividades investigativas.

Na Etapa 3 da sequência didática, foi realizada uma pesquisa bibliográfica orientada. Nessa etapa, buscou-se analisar a capacidade dos estudantes de sintetizar informações complexas, bem como a qualidade e a confiabilidade das fontes selecionadas. Além disso, foram considerados critérios como a clareza e a precisão na interpretação teórica dos conteúdos pesquisados, aspectos essenciais para o desenvolvimento da competência argumentativa e da autonomia intelectual.

Nesta etapa da sequência didática, os grupos mantiveram-se os mesmos da etapa anterior. O professor distribuiu os materiais previamente selecionados — disponibilizados tanto em links digitais quanto em versões impressas — e solicitou que os estudantes realizassem uma busca nos sumários desses documentos, com o objetivo de identificar conteúdos relacionados às palavras-chave elencadas na etapa anterior. A oferta dos materiais impressos teve como finalidade atender aos grupos que enfrentassem dificuldades de conexão à internet ou que simplesmente preferissem trabalhar com o formato físico.

Inicialmente, observou-se um interesse mais acentuado por parte dos alunos em relação ao material correspondente ao terceiro link, intitulado "A Física Nuclear e Suas Aplicações: Uma Abordagem Voltada ao Ensino Médio". Esse interesse surgiu especialmente após um dos grupos localizar, na Parte II do sumário, a seção intitulada "As Armas Nucleares", acompanhada dos subtítulos "As Bombas de Hiroshima e Nagasaki", "A Bomba H" e "Os Arsenais Nucleares". Um dos estudantes, entusiasmado com a descoberta, exclamou em voz alta: "Aqui! Aqui vamos achar alguma coisa!". A reação despertou a atenção dos demais grupos, que prontamente quiseram saber a qual material ele se referia. O estudante indicou a apostila utilizada e apontou a seção específica do sumário, o que motivou os demais grupos a iniciarem, também, uma busca mais aprofundada nessa parte do material.

A partir dessas leituras, os estudantes começaram a estabelecer conexões entre os armamentos nucleares e os processos de fissão e fusão nuclear, o que representou um importante avanço em relação à construção de uma compreensão mais integrada dos conceitos científicos envolvidos. Esse movimento de ampliação do olhar e aprofundamento do conteúdo motivou os grupos a explorarem também os materiais dos outros links, com foco nos tópicos relacionados à fissão e fusão nuclear.

Esse comportamento investigativo dos estudantes, impulsionado pela curiosidade diante da temática das armas nucleares, é coerente com a perspectiva de Mortimer, Machado e Romanelli (2000), que acredita que os alunos compreendem a

Química (e, por extensão, as Ciências da Natureza) como um campo do conhecimento profundamente conectado às dimensões sociais, uma vez que essa Ciência está presente de forma concreta na sociedade e no ambiente que nos cerca.

Neste momento da sequência didática, fica evidente como a curiosidade dos estudantes, associada a uma abordagem investigativa, foi fundamental para mobilizá-los à busca e à compreensão de objetos de conhecimento científicos vinculados à temática trabalhada e socialmente relevante.

A partir da análise realizada, é possível considerar que todos os grupos apresentaram progresso no processo de aprendizagem, sobretudo em relação ao reconhecimento dos conceitos de fissão e fusão nuclear. No entanto, a leitura e a interpretação dos fenômenos ainda evidenciaram lacunas significativas na compreensão de alguns conceitos fundamentais e seus significados.

De modo específico, constatou-se que os estudantes demonstraram dificuldades em identificar e compreender as partículas envolvidas nas reações em cadeia características dos processos de fissão nuclear. Essa constatação se evidencia pelo registro no diário de bordo do professor, no qual se observa que, durante os debates, os estudantes não conseguiam descrever adequadamente as partículas presentes tanto nos processos de fissão quanto de fusão nuclear, além de não representarem as emissões relacionadas aos diferentes tipos de radiação. Ademais, notou-se uma limitação na capacidade de estabelecer relações entre esses processos e os aspectos submicroscópicos da radioatividade, tais como as partículas, as ondas, as forças eletromagnéticas e as forças nucleares, que envolvem o mecanismo de estabilidade e instabilidade dos átomos.

Dessa forma, os estudantes avançaram na compreensão conceitual básica dos processos de fissão e fusão nuclear, seus diálogos demonstravam reconhecer a união de núcleos menores para formar um núcleo maior (fusão) e a fragmentação de núcleos maiores em núcleos menores (fissão). O nível teórico e de articulação de conhecimento sobre radioatividade permaneceu abaixo do esperado. Por esse motivo, classificamos o desempenho dos estudantes como parcialmente satisfatório, reconhecendo o progresso alcançado ao longo da pesquisa bibliográfica, mas também destacando as dificuldades persistentes na assimilação dos aspectos teóricos do objeto de conhecimento em questão.

A etapa 4 da sequência didática foi composta por duas aulas expositivas consecutivas, cada uma com duração de 50 minutos. Essas aulas tiveram como foco

a consolidação de conceitos teóricos essenciais para a compreensão dos fenômenos da radioatividade e dos processos de fissão e fusão nuclear. Iniciamos a atividade com a presença de 15 estudantes.

A aula foi iniciada com uma breve contextualização feita pelo professor sobre a interação da radiação com os seres humanos, com o objetivo de despertar o interesse e estabelecer conexões significativas com o cotidiano dos estudantes. Essa abordagem inicial visou motivar a turma para os objetos de conhecimento que seriam trabalhados, promovendo uma abertura mais engajadora para o tópico.

Em seguida, deu-se início à apresentação teórica, abordando os conceitos fundamentais de radiação, estrutura da matéria, do átomo e do núcleo atômico. Foram introduzidos e discutidos também os conceitos de isótopos, partículas e ondas, poder de penetração da radiação e o conceito de meia-vida. Após essa explanação, foi exibido o vídeo intitulado “*O que é a Radioatividade? Como ela Funciona?*” (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CGar94Wmzh4>).

A escolha do vídeo se mostrou acertada, pois, além de reforçar os conceitos apresentados, contribuiu para a manutenção do interesse e da curiosidade dos estudantes, ampliando sua compreensão por meio de uma abordagem mais visual e contextualizada. A articulação entre teoria e aplicações práticas da radioatividade — discutidas após a exibição — permitiu um debate em sala que contribuiu para a construção ativa do conhecimento.

Na sequência, abordamos os processos de fissão e fusão nuclear, apresentando suas definições, características principais e respectivas representações simbólicas. Após a explicação, os estudantes foram convidados a representar no quadro uma reação em cadeia de fissão nuclear. Durante essa atividade, uma das estudantes omitiu a liberação de energia como produto da reação. O professor, ao perceber a omissão, instigou os demais colegas a refletirem sobre o que poderia estar faltando naquela representação. Diante da dificuldade geral da turma em lembrar do elemento ausente, o professor estabeleceu uma conexão entre o processo de fissão nuclear e o funcionamento das bombas nucleares, especialmente as que foram lançadas sobre o Japão durante a Segunda Guerra Mundial. As evidências desse episódio foram registradas no diário de bordo do professor, servindo como subsídio para a análise posterior dos resultados da pesquisa. A partir dessa contextualização, questionou-se a turma sobre o que provocava a explosão da bomba e a origem da luz vermelha emitida. Um dos estudantes mencionou espontaneamente a palavra

"energia", ao que outro complementou: *"Pois é! Sem energia, como vai explodir?"*. Esse momento foi significativo, pois demonstrou que, apesar da dificuldade inicial, os estudantes conseguiram acessar o conhecimento previamente discutido e relacioná-lo ao fenômeno físico em questão.

Aproveitando o gancho do diálogo, introduziu-se a discussão sobre o processo de fusão nuclear, fazendo um paralelo com as bombas termonucleares. Também foram abordadas as diferenças energéticas entre os processos de fissão e fusão. Em seguida, levantou-se um questionamento sobre as vantagens e desvantagens desses dois processos. Como, até aquele momento, os exemplos trabalhados haviam sido centrados em aplicações bélicas, os estudantes, conforme descrito no diário de bordo do professor, inicialmente afirmaram que não percebiam vantagens em tais processos. Esse posicionamento abriu espaço para que o professor ampliasse a discussão, trazendo à tona as aplicações pacíficas e benéficas, como a utilização da fissão nuclear em usinas de geração de energia e a ocorrência natural da fusão nuclear nas estrelas. Essa abordagem expandiu o repertório dos estudantes e permitiu uma ressignificação do conhecimento, mostrando que as aplicações da radioatividade vão muito além dos usos destrutivos que costumam ser mais divulgados.

Para reforçar os objetos de conhecimento abordados, foi exibido um segundo vídeo, que apresentou de maneira contextualizada os processos de fissão e fusão nuclear: *Como funciona uma bomba nuclear e por que causa tanta destruição?*" (disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=f18W_ITQGa8).

Finalizamos essa etapa da sequência didática com um debate coletivo. A atenção esteve voltada, sobretudo, para a assimilação dos conceitos teóricos abordados ao longo das atividades e para a capacidade de representá-los, com ênfase nos processos nucleares discutidos em sala. O foco central do debate esteve na análise das representações dos dois principais processos abordados: fissão e fusão nuclear.

O professor iniciou o debate solicitando que algum(a) estudante descrevesse, verbalmente, as partículas envolvidas e o mecanismo da fissão nuclear. Inicialmente, observou-se uma participação tímida, com poucos estudantes se manifestando. Diante disso, o professor reformulou a abordagem, perguntando se os(as) estudantes conseguiam conceituar, de forma simples, os dois processos nucleares discutidos: fissão e fusão nuclear. Os estudantes E.5, E.9 e E.15 se manifestaram, respondendo que, respectivamente, a fusão nuclear seria a junção de átomos menores para formar

um maior, enquanto a fissão corresponderia à divisão de um átomo maior em dois menores.

A partir dessas respostas iniciais, o professor questionou se os(as) estudantes poderiam descrever o processo pelo qual ocorreria essa fissão. Novos(as) estudantes, diferentes dos primeiros que haviam respondido, passaram a participar ativamente, colaborando na descrição do mecanismo da reação em cadeia. O interessante é que, mesmo sem a mediação direta do professor, os(as) estudantes espontaneamente avançaram o debate para o processo de fusão nuclear. Um deles verbalizou: “*Nesse daí tem aqueles hidrogênios que se unem para formar o hélio*”. Nesse momento, foi possível identificar um movimento de construção conceitual em curso, com evidências de compreensão inicial dos princípios envolvidos nos dois processos nucleares.

O debate também contemplou a discussão sobre as aplicações práticas da fissão e da fusão nuclear, indo além do contexto armamentista. Os(as) estudantes conseguiram compreender que a fissão nuclear, além de seu uso em armamentos, também está presente nas usinas nucleares, onde a reação ocorre de forma controlada, possibilitando a geração de energia elétrica. Um estudante, ao refletir sobre essa dualidade de uso, afirmou: “*Então, professor, pensando na fissão nuclear só como bomba atômica, não tem benefício. Mas nas usinas nucleares a gente pode dizer que existem benefícios, né?*”

Esse momento foi significativo, pois evidenciou um processo ativo de construção de sentido pelos(as) estudantes, ainda que com limitações na clareza conceitual e na articulação entre teoria e representação. Dessa forma, é possível afirmar que os(as) estudantes demonstraram uma assimilação parcial dos objetos de conhecimento, apresentando progresso na apropriação dos conceitos nucleares, porém ainda com dificuldades em estabelecer conexões mais amplas e precisas entre os aspectos teóricos e suas representações simbólicas.

Diante disso, de acordo com o descrito na rubrica, para os critérios teóricos e representacionais, o desempenho dos(as) estudantes nesta etapa foi classificado como parcialmente satisfatório, evidenciando avanços importantes, embora ainda demandando maior aprofundamento e consolidação dos conhecimentos construídos.

Na etapa 5 buscou-se avaliar a capacidade dos estudantes de aplicar conceitos teóricos em um ambiente interativo, por meio da simulação de processos relacionados à temática nuclear. O foco principal esteve na tradução do conhecimento teórico em

ações práticas, atendendo ao critério fenomenológico previsto para esta etapa da sequência didática.

A atividade ocorreu na sala de informática da escola, onde cada estudante, individualmente, utilizou um computador. O professor orientou os alunos a acessarem o simulador NUKEMAP, disponível em <https://nuclearsecrecy.com/nukemap/>, abrindo também, em outra aba, a página de buscas do Google. Inicialmente, o docente demonstrou como utilizar a ferramenta de busca para localizar os locais onde as detonações virtuais ocorreriam, bem como selecionar as ogivas no simulador. Esse simulador permite escolher uma localização e a magnitude da bomba a ser detonada. Após a detonação, é possível visualizar o raio e as consequências da explosão.

Na primeira parte da atividade, os estudantes foram instruídos a realizar três detonações específicas: Na cidade de Hiroshima, utilizando a ogiva *Little Boy*, em Nagasaki, com a ogiva *Fat Man*, novamente em Hiroshima e Nagasaki, agora com a ogiva *Tsar Bomba*, de 50 megatons.

Após cada detonação, os estudantes deveriam observar e registrar os efeitos provocados, tais como a extensão do raio de destruição, os danos térmicos e a dispersão da radiação. Além disso, o professor solicitou que pesquisassem os princípios físicos por trás do funcionamento de cada ogiva utilizada. Na sequência, foi proposta uma atividade de aplicação mais livre: cada estudante deveria arrastar o marcador do simulador para uma localidade brasileira de sua escolha e repetir o procedimento com três ogivas diferentes. Como na etapa anterior, a pesquisa sobre o funcionamento de cada bomba fazia parte da tarefa.

Durante a realização das atividades, observou-se uma forte reação de espanto por parte dos estudantes diante da magnitude dos efeitos provocados pelas bombas de maior potência, especialmente aquelas com princípios baseados na fusão nuclear. O impacto visual da simulação e a comparação entre as diferentes ogivas estimularam o interesse e fomentaram discussões espontâneas entre os estudantes.

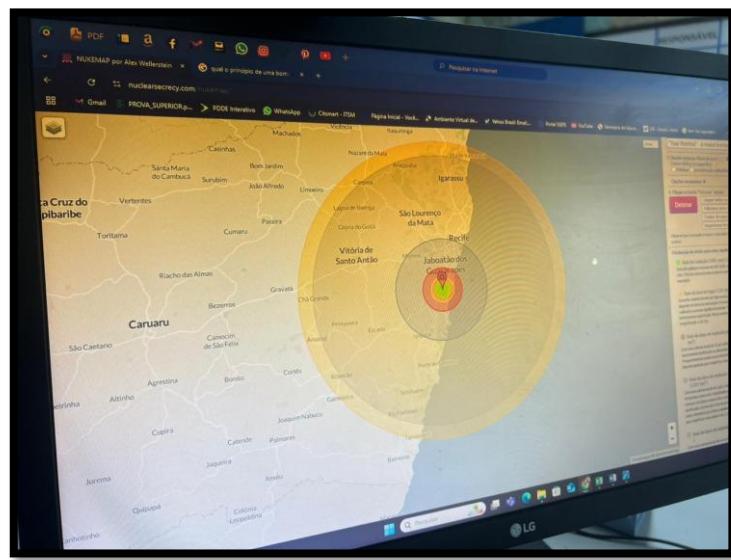
Em um desses momentos, ao ser questionada a razão pela qual algumas bombas apresentavam maior poder destrutivo do que outras, uma primeira hipótese foi levantada pelo estudante E.9, que atribuiu essa diferença à quantidade de combustível utilizado. No entanto, outros estudantes argumentaram que o fator determinante estava nos princípios físicos envolvidos. Com base em suas pesquisas, eles identificaram que as ogivas de maior poder utilizavam o princípio da fusão nuclear, enquanto outras, menos potentes, operavam por meio do processo de fissão

nuclear. Essa distinção foi prontamente conectada ao conteúdo abordado anteriormente, no momento em que havia sido discutido que a fusão nuclear libera significativamente mais energia do que a fissão nuclear.

Esse momento de correlação entre a simulação virtual e a teoria nuclear previamente discutida evidencia a construção de conhecimentos. A capacidade dos estudantes de argumentar, justificar e relacionar conceitos físicos complexos aos efeitos observados nas simulações demonstra uma certa compreensão dos objetos de conhecimento abordados. Nota-se que os alunos não apenas memorizaram informações, mas conseguiram aplicar e discutir os princípios científicos envolvidos, o que é coerente com o nível fenomenológico do conhecimento.

Portanto, considerando as interações, os debates e as relações estabelecidas entre Ciência e cotidiano, conclui-se que, de acordo com a rubrica estabelecida para essa etapa, o desempenho dos estudantes nesta etapa foi satisfatório. Eles demonstraram domínio conceitual e capacidade de análise crítica diante das simulações realizadas, o que confirma o alcance dos objetivos propostos para este momento da sequência didática.

Figura 29 - Imagem dos estudantes utilizando o simulador virtual NUKEMAP.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Na etapa 6 da sequência didática, os estudantes foram organizados em quatro grupos de cinco integrantes para participarem de uma atividade lúdica em formato de *quiz*, utilizando o aplicativo *Kahoot*. A distribuição dos grupos foi feita de forma

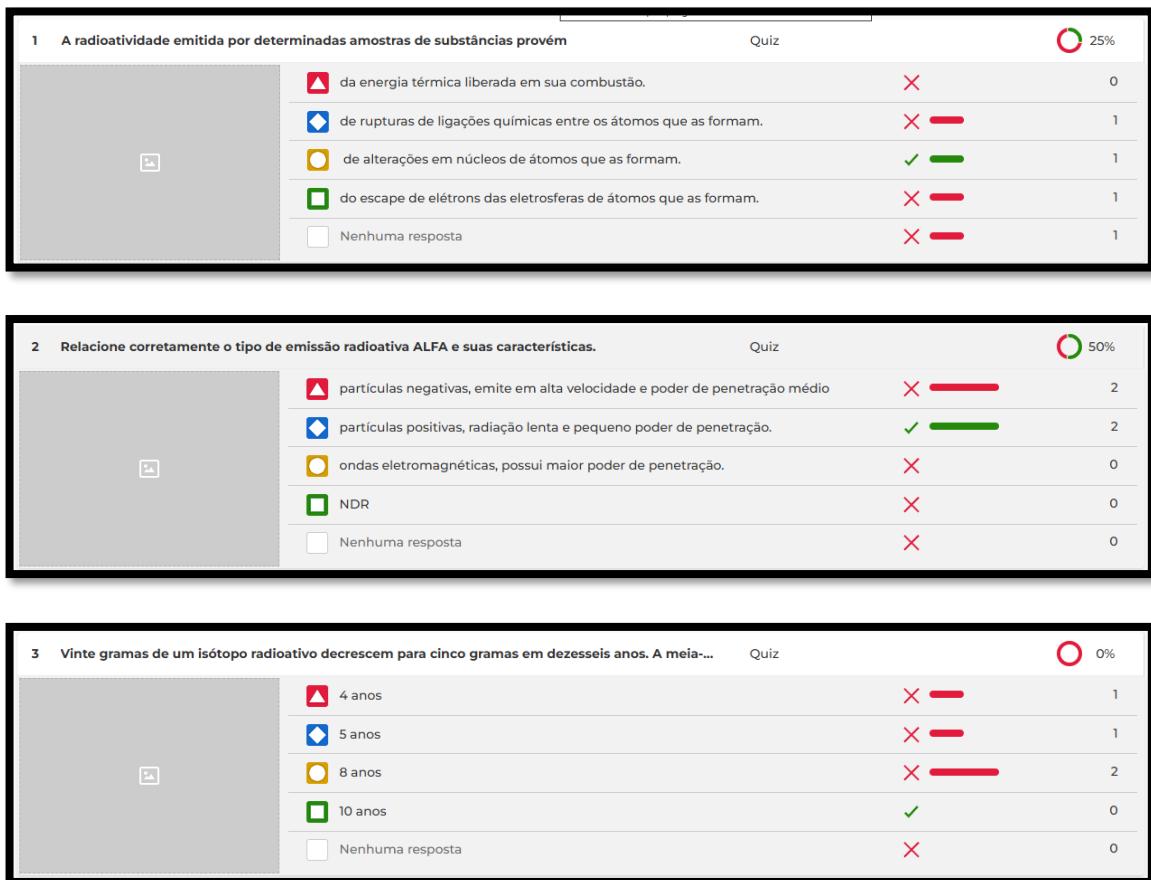
aleatória pelo professor, com a intencionalidade de evitar agrupamentos por afinidade pessoal, buscando mesclar os estudantes de acordo com seus diferentes níveis de desempenho.

Inicialmente, os grupos acessaram o aplicativo através do código disponibilizado e atribuíram nomes às suas equipes. Apesar de o professor não interferir na escolha dos nomes, optou por não permitir comentários sobre eles, encerrando a aula com uma breve fala reflexiva sobre a importância da seriedade nas atividades escolares. Argumentou, entre outros pontos (não diretamente relacionados à pesquisa), que a escola deve ser encarada como um espaço preparatório para a vida social e profissional, sinalizando implicitamente a necessidade de engajamento, ética e comprometimento nos processos formativos.

O tempo estipulado para cada questão foi de 30 segundos. No decorrer da atividade, observou-se que esse tempo se mostrou insuficiente para a leitura atenta e compreensão de algumas perguntas, especialmente à medida que os grupos se depararam com questões que exigiam maior elaboração cognitiva.

As três primeiras perguntas do quiz estavam relacionadas a conceitos fundamentais da radioatividade, tais como: o conceito em si, tipos de emissões de partículas e tempo de meia-vida. Conforme ilustrado na Figura 30, essas questões revelaram um desempenho inicial insatisfatório por parte dos grupos, tanto em termos de acertos quanto de engajamento com o conteúdo em si. No entanto, o baixo desempenho serviu de gatilho para uma mobilização significativa dos estudantes, que passaram a interagir mais intensamente com o professor e entre si, buscando compreender as respostas corretas. Esse movimento gerou um debate espontâneo e produtivo, no qual dúvidas foram sanadas e interpretações discutidas de maneira colaborativa.

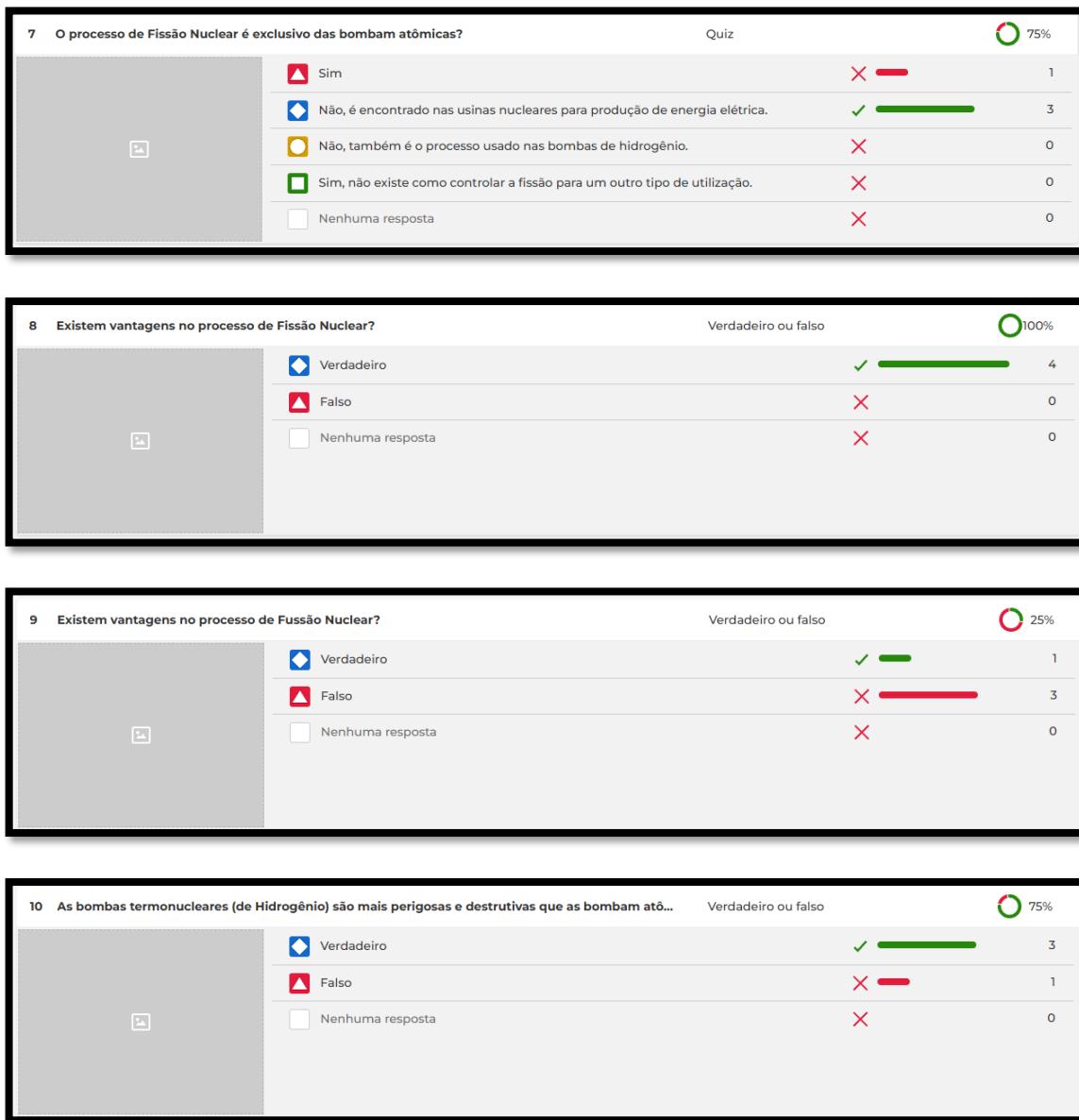
Figura 30 - Questões 1, 2 e 3 do quiz.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A partir da quarta questão, o foco do quiz passou a recair sobre os processos de fissão e fusão nuclear. Conforme representado na Figura 31, as perguntas 7, 8, 9 e 10 foram elaboradas de forma a privilegiar o nível fenomenológico de conhecimento, uma vez que abordavam os conceitos por meio de situações contextualizadas. Nessas questões, observou-se um desempenho significativamente mais satisfatório por parte dos grupos, com elevado número de acertos.

Figura 31 - Questões 7, 8, 9 e 10 do quiz.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Na questão 7, por exemplo, o único grupo que errou demonstrou surpresa e dúvida ao visualizar a resposta correta. Questionados pelos colegas, os integrantes rapidamente perceberam que haviam interpretado erroneamente o enunciado, confundindo o fato de a bomba atômica se basear na fissão com a ideia de que esse processo não teria outras aplicabilidades além da destruição.

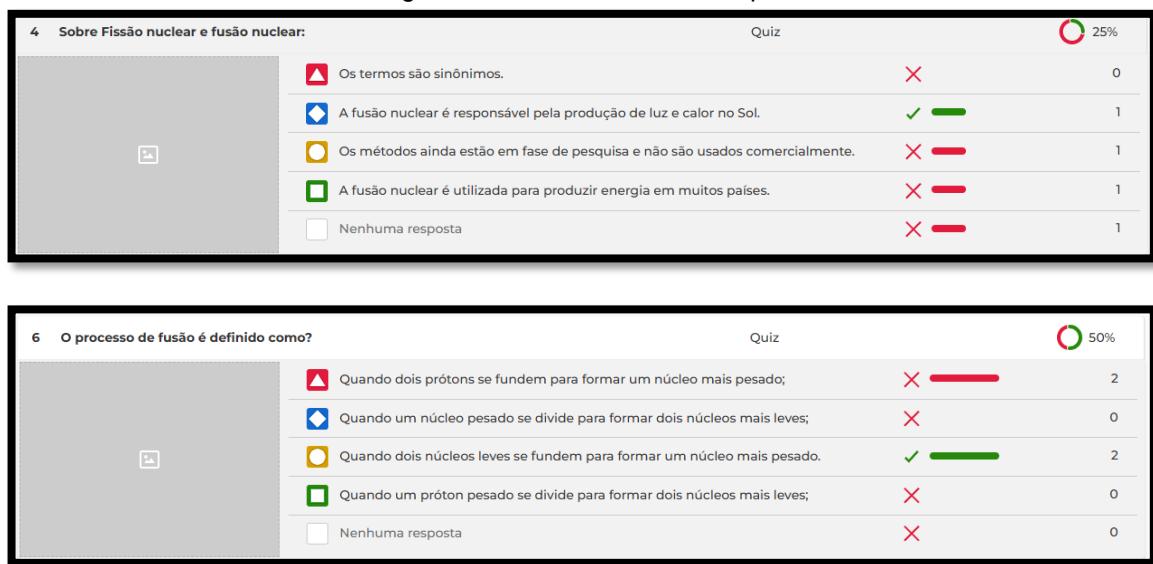
Na questão 9, três dos quatro grupos erraram. No entanto, o grupo que acertou prontamente comentou que a fusão nuclear ocorre nas estrelas, trazendo benefícios significativos. O estudante E.14 complementou afirmando: “Se fosse só nas bombas, não teria vantagem”. Após esse comentário, os demais grupos demonstraram

conhecer a resposta correta, mas revelaram ter sido influenciados pela associação automática entre fusão nuclear e bombas de hidrogênio, o que os levou a equívocos interpretativos. O tempo curto para resposta também foi citado como fator que dificultou o raciocínio mais reflexivo.

Na última questão do *quiz*, um grupo divergiu dos demais quanto à resposta. Antes mesmo de qualquer intervenção docente, os próprios estudantes dos outros grupos passaram a comentar e relacionar a pergunta à aula anterior, a qual havia utilizado simuladores. Isso motivou os integrantes do grupo que havia errado a rememorar suas experiências e testes realizados, demonstrando que, apesar do erro, houve uma retomada significativa do conhecimento construído anteriormente. Tal movimento evidencia que os estudantes conseguiram estabelecer conexões relevantes com os aspectos fenomenológicos, associando conceitos científicos às situações práticas vivenciadas.

Com relação ao critério teórico, analisado especialmente nas questões 4 e 6, observou-se um desempenho parcialmente satisfatório. Na questão 6, os estudantes demonstraram compreender o processo de fusão como a união de partículas leves para formar outras mais pesadas. Contudo, houve incertezas sobre quais partículas específicas estariam envolvidas nesse processo, revelando lacunas na compreensão do conteúdo em profundidade. Isso indica um avanço conceitual, mas também evidencia a necessidade de reforçar as conexões entre os conceitos nucleares e seus fundamentos teóricos.

Figura 32 - Questões 4 e 6 do quiz.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A questão 5 permitiu avaliar o desempenho dos estudantes frente ao critério representacional, já que envolvia a identificação correta de um processo de fusão nuclear por meio de uma imagem. Todos os grupos responderam corretamente, de forma rápida e segura. Durante a atividade, alguns estudantes discutiram a representação dos isótopos de hidrogênio e a formação do hélio. No entanto, havia um erro proposital na imagem — o símbolo do hélio estava representado erroneamente com a notação do hidrogênio. O professor, ao perceber isso durante a apresentação, optou por não interferir inicialmente, a fim de observar se algum estudante identificaria a inconsistência. Após o término da pergunta, reabriu a imagem e questionou a turma sobre o erro. Após breve silêncio, o estudante E.19 apontou que o hidrogênio aparecia com número atômico 2, quando deveria ser 1. Outra estudante logo complementou: “Ali deveria ter o hélio, porque na fusão nuclear os hidrogênios se juntam e viram hélio.” Esse momento evidenciou um processo ativo de construção de conhecimento, confirmando um desempenho satisfatório dos estudantes no nível representacional, ao demonstrarem uma compreensão sólida e articulada das imagens e simbologias científicas.

Dando continuidade à análise da sequência didática implementada, apresentaremos, a seguir, a avaliação dos níveis de desempenho dos quatro grupos de estudantes que participaram da atividade de resolução de problemas, última etapa. Esta avaliação foi conduzida com base nos níveis do conhecimento químico definidos nas rubricas de desempenho — fenomenológico, teórico e representacional — (Quadro 4).

A escolha pela realização do trabalho em grupo fundamenta-se em pressupostos teóricos consolidados no campo da Didática das Ciências, que reconhecem os benefícios da aprendizagem colaborativa no desenvolvimento da autonomia intelectual e das habilidades sociais. Nesse sentido, Leite e Afonso (2001, p. 254) destacam que:

As razões que conduziram à dispersão do ensino orientado na metodologia por resolução de problemas por todo o mundo têm a ver, por um lado, com o facto de ele permitir aos alunos tirarem o máximo de partido do estudo independente e, por outro lado, de utilizar a resolução de problemas em pequenos grupos, aspectos que têm a ver não só com a autonomia, mas também com a cooperação e a vida em sociedade.

A análise das respostas dos grupos, portanto, não se restringe à verificação da exatidão conceitual das soluções apresentadas, mas se alinha à abordagem metodológica da resolução de problemas (RP), tal como discutida por Pozo (1998), Leite e Afonso (2001), Leite e Esteves (2005) e, mais recentemente, por Freitas (2022). Segundo esta última autora, tais propostas convergem em diversos aspectos fundamentais: o início das atividades com a apresentação de um problema real e significativo; o incentivo à formulação de hipóteses e à definição do problema pelos próprios estudantes; a utilização de múltiplos recursos didáticos como suporte investigativo; a valorização do trabalho em grupo como estratégia para favorecer as interações entre pares e com o professor; a oportunidade de apresentar (ou não) soluções após a vivência das etapas investigativas; e, finalmente, a realização de uma avaliação que considere tanto a pertinência das respostas quanto a análise do processo como um todo. Essa avaliação deve contemplar os conhecimentos conceituais, procedimentais e atitudinais mobilizados ao longo da sequência, permitindo uma leitura mais ampla e integrada da aprendizagem. A partir desse referencial teórico-metodológico, passamos à descrição e discussão dos desempenhos apresentados por cada grupo, à luz das rubricas de desempenho estabelecidas (Quadro 4).

Quatro equipes de estudantes solucionaram o problema novamente. O Quadro 8 apresenta a solução do grupo G.1:

Quadro 8 - Solução final do grupo G.1 para o problema proposto.

Olá, pessoal do Futuro!

Eu e meu grupo de amigas de adolescente vivendo em 2025, e estou escrevendo essa carta pra vocês que talvez nem tenham ideia do que a gente está passando agora. Hoje em dia, o mundo está cheio de problemas guerras, mudanças climáticas, inteligência artificial descontrolada. Mas o que mais me assusta é o perigo das armas nucleares.

Existe um relógio simbólico chamado Relógio do Juízo final que mostra o quão perto estamos de um desastre global. E adivinha? Estamos a só 90 segundos da meia-noite. Isso é quase um aviso de que a humanidade pode acabar a qualquer momento se a gente não mudar o rumo.

As bombas nucleares funcionam com processos chamados fissão e fusão nuclear. Na fissão, um átomo grande se divide em dois menores, liberando muita energia. Já na fusão, dois átomos pequenos se juntam e liberam ainda mais energia, é como funciona no sol! Essas reações criam explosões absurdamente poderosas, que podem destruir cidades inteiras.

Mas nem tudo isso é só destruição. A mesma tecnologia pode ser usada por coisas boas, como gerar energia nas usinhas, tratamento de doenças, tipo o câncer. A Ciência não é o problema!!! O problema é como a gente escolhe usar ela.

Então, por favor. Para você que está lendo essa carta usem a energia nuclear para juntar as pessoas e não para destruir e ameaçar o mundo.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

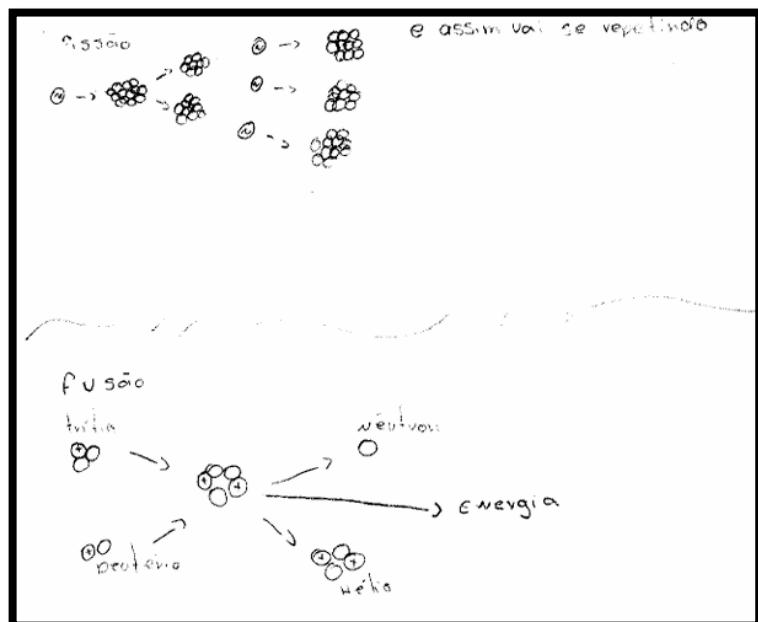
A solução do grupo G.1 demonstra mobilização de conhecimentos do nível teórico e fenomenológico em relação à radioatividade. O nível representacional não aparece na solução. Em relação ao nível fenomenológico, a resposta foi classificada como satisfatória, pois contextualiza algumas aplicações da fusão e da fissão nuclear. Quanto ao nível teórico, foi avaliada como parcialmente satisfatória por não apresentar mais detalhes sobre as partículas envolvidas nos processos de fissão e fusão nuclear.

O Quadro 9 apresenta a solução do grupo G.2:

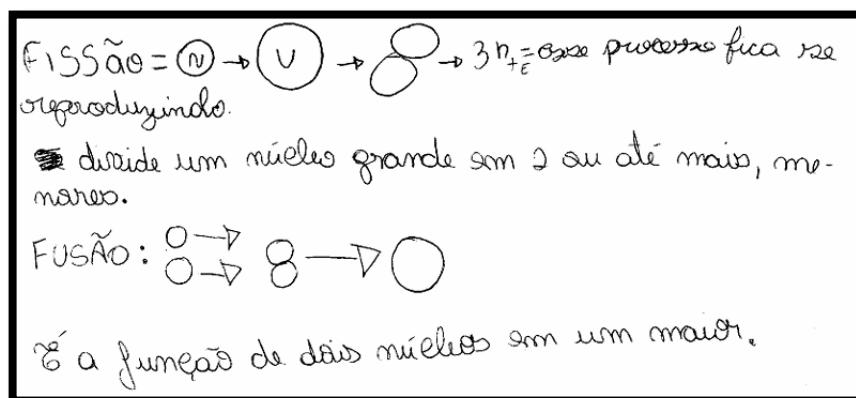
Quadro 9 - Solução final do grupo G.2 para o problema proposto.

Por meio desta carta, venho alertá-los sobre os processos que ocorrem nas bombas nucleares.

Existem dois processos:



Esse processo fica se reproduzindo. Divide um núcleo grande em 2 ou até mais menores.



É a junção de dois núcleos em um maior.

O processo de fissão não é exclusivo das bombas nucleares, é encontrado nas usinas nucleares, esta é a única vantagem desse processo, e as desvantagens são as destruições, os lixos que contaminam o meio ambiente, muda o DNA e causa vários efeitos durante os anos.

O processo de fusão não é exclusivo das bombas nucleares, é encontrado no sol, é junção de energia extremamente forte, que não foi encontrada formas para controlar, por esse motivo, não é encontrado em outros processos como nas usinas nucleares.

Nesse processo, a única é o sol e as desvantagens são mais perigosas, por causa da liberação de energia que é extremamente forte.

A solução apresentada pelo grupo G.2 evidencia a construção de conhecimentos nos três níveis de compreensão da radioatividade: teórico, fenomenológico e representacional, conforme os critérios utilizados para a avaliação da proposta. Esses níveis foram analisados separadamente, permitindo uma avaliação mais precisa do desempenho do grupo em cada aspecto.

No nível fenomenológico, a resposta foi considerada satisfatória, pois o grupo demonstrou reconhecer e citar corretamente aplicações práticas da radioatividade, o que revela a compreensão dos fenômenos observáveis associados ao tema. Já no nível teórico, a solução foi avaliada como parcialmente satisfatória, visto que, embora o grupo tenha identificado os processos de fissão e fusão nuclear, faltaram explicações mais detalhadas sobre as partículas envolvidas nesses processos, o que compromete uma compreensão mais profunda dos mecanismos atômicos subjacentes. Quanto ao nível representacional, o grupo apresentou uma descrição adequada do mecanismo de reação em cadeia e dos processos de divisão e junção de núcleos, o que demonstra domínio das representações associadas. No entanto, a ausência de menção à energia liberada nesses processos nucleares limitou a completude da explicação, levando a uma classificação parcialmente satisfatória nesse critério.

O Quadro 10 apresenta a solução do grupo G.3:

Quadro 10 - Solução final do grupo G.3 para o problema proposto.

Olá amigos do futuro, venho alertá-los sobre um possível confronto causado pelas chamadas "Bombas nucleares" que são feitas no processo de radioatividade, Urânio e Nitrogênio, processos como fissão e fusão causando destruição em massas na humanidade. Diante do problema venho-lhe alertar e lhe ensinar sobre todo o processo em fissão temos um nêutron que toca no núcleo dando início a uma reação demasiada em cadeia e no processo, em fusão quando os núcleos pesados se fundem tornando em energia maior, porém devemos olhar para os pontos negativos e positivos dessas armas.

Esses processos não exclusivos das bombas nucleares, mas também do sol e das usinas nucleares, o sol se utiliza da fusão para o seu funcionamento. E as usinas se utilizam de vários processos radioativos ou não, como a fissão. Um dos benefícios é energia criada através da radiação, e a radiação solar que é importante para os seres humanos, devemos levar em conta os riscos que é o descarte desse material radioativo. No entanto, tomem cuidados e fiquem atentos!

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A solução do grupo G.3 demonstra a construção de conhecimentos do nível teórico e fenomenológico. O grupo não apresentou nenhum aspecto representacional em relação à radioatividade. Em relação ao nível fenomenológico, a resposta foi classificada como satisfatória, pois cita aplicações da radioatividade. Quanto ao nível teórico, foi avaliada como parcialmente satisfatória por não apresentar mais detalhes sobre as partículas envolvidas nos processos de fissão e fusão nuclear e menciona apenas a junção de núcleos atômicos (fusão).

O Quadro 11 apresenta a solução do grupo G.4:

Quadro 11 - Solução final do grupo G.4 para o problema proposto.

Oi geração futura

O Assunto de hoje é sério e importante, algo que vocês nunca viram.

Vejo que a várias consequências no uso das bombas nucleares e os processos são devastadores - químicos e físicos, existem tanto benéficos e malefícios, como a destruição = criação de bomba e os benefícios a questão das usinas isso é chamado de fusão.

Fusão é a união e fissão é a separação. Na Fissão – um átomo pesado se divide em dois, liberando uma quantidade de grande de energia.

Tome cuidado com essas radioatividades, usando de maneira errada o mundo vai ser destruído.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A solução do grupo G.4 demonstra a construção de conhecimentos do nível teórico e fenomenológico. A equipe não apresentou nenhum aspecto representacional em relação à radioatividade. Em relação ao nível fenomenológico, a resposta foi classificada como parcialmente satisfatória, pois cita aplicações da radioatividade sem nenhuma profundidade. Quanto ao nível teórico, foi avaliada como insatisfatória por não apresentar mais detalhes sobre as partículas envolvidas nos processos de fissão e fusão nuclear e menciona apenas a divisão de núcleos atômicos (fissão).

As soluções dos grupos foram agrupadas no Quadro 12:

Quadro 12 – Classificação das soluções dos grupos para o problema proposto.

Grupos	Nível de Conhecimento	Desempenho
G.1	Teórico	Solução parcialmente satisfatória
	Fenomenológico	Solução satisfatória
	Representacional	Não identificado
G.2	Teórico	Solução parcialmente satisfatória
	Fenomenológico	Solução satisfatória
	Representacional	Solução parcialmente satisfatória
G.3	Teórico	Solução insatisfatória
	Fenomenológico	Solução satisfatória
	Representacional	Não identificado
G.4	Teórico	Solução insatisfatória
	Fenomenológico	Solução parcialmente satisfatória
	Representacional	Não identificado

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

De acordo com os dados do Quadro 12, o nível de conhecimento fenomenológico foi o que obteve mais soluções satisfatórias. Isso indica que os estudantes construíram conhecimentos importantes sobre as aplicações da radioatividade. O nível teórico de conhecimento, por ser o mais complexo e abstrato, não obteve soluções satisfatórias. Isso indica que os conhecimentos teóricos sobre radioatividade devem ser explorados com maior tempo, respeitando o tempo de aprendizagem dos estudantes. Apenas um grupo expressou o nível de conhecimento representacional e de forma parcialmente satisfatória. Isso pode estar ligado ao enunciado do problema proposto, que não destacou a representação como solução. Ainda assim, o nível representacional merece ser destacado no ensino de radioatividade.

De uma forma geral, houve avanços em relação às compreensões sobre radioatividade entre os estudantes, sobretudo em relação ao nível fenomenológico. É importante destacar que as soluções condenaram o uso bélico da radioatividade e privilegiaram aplicações pacíficas dos processos radioativos, como a geração de energia e o tratamento de câncer. Verificou-se que a sequência didática foi um momento imersão nos fenômenos radioativos que impactou o cotidiano escolar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa demonstrou que a metodologia de resolução de problemas, quando bem estruturada, pode se constituir em uma poderosa ferramenta de mediação didática, promovendo avanços significativos na aprendizagem de conteúdos complexos como os processos de fissão e fusão nuclear. Ao articular situações desafiadoras à realidade dos(as) estudantes com atividades investigativas, discussões colaborativas e exploração de múltiplas linguagens da Química, a sequência didática permitiu uma transformação gradual, mas consistente, dos níveis de compreensão científica dos(as) participantes.

Desde a etapa inicial de diagnóstico, ficou evidente a limitação dos estudantes em articular fenômenos científicos com o cotidiano, interpretar os processos atômicos em nível submicroscópico e empregar representações simbólicas apropriadas. A quase totalidade das respostas iniciais ao problema foi classificada como insatisfatória nos critérios fenomenológico, teórico e representacional, evidenciando que a mera exposição ao conteúdo, em contextos não formais, não seria suficiente para promover a aprendizagem esperada.

A adoção da metodologia de resolução de problemas, no entanto, introduziu um novo dinamismo ao processo de ensino-aprendizagem. O uso do problema como ponto de partida motivou a curiosidade e promoveu a construção coletiva de sentido. Etapas como o debate em grupo (Etapa 2), a pesquisa bibliográfica orientada (Etapa 3), o uso de simuladores interativos (Etapa 5) e a gamificação com o *quiz* (Etapa 6) permitiram aos estudantes vivenciar a Química em múltiplas dimensões — conceitual, prática e reflexiva — possibilitando desempenhos mais satisfatórios.

Durante as discussões em grupo, por exemplo, observaram-se manifestações iniciais de raciocínio analógico, especialmente quando os estudantes começaram a associar termos como "urânio", "fusão", "energia" e "plutônio" aos contextos de uso tecnológico e militar da radioatividade. Embora as primeiras tentativas tenham sido imprecisas, elas demonstraram disposição investigativa e construção ativa de hipóteses — elementos centrais da metodologia de resolução de problemas. Mais adiante, no aprofundamento das atividades, os estudantes conseguiram estabelecer conexões mais sólidas entre a temática das armas nucleares e os processos físicos que as sustentam, refletindo sobre implicações sociais e ambientais.

As interações promovidas ao longo da sequência didática evidenciaram o quanto a troca entre pares favorece a construção do conhecimento. Momentos como o debate após o uso do simulador *NUKEMAP*, por exemplo, revelaram que os(as) estudantes não apenas entenderam a diferença entre fissão e fusão nuclear, mas conseguiram explicá-la uns aos outros com base nas experiências e nas observações da atividade.

O caráter integrador da resolução de problemas também foi notável. Ao longo das atividades, os estudantes passaram a compreender que os fenômenos científicos discutidos em sala extrapolam o ambiente escolar, estando profundamente conectados a dilemas éticos, impactos ambientais e usos tecnológicos contemporâneos. Isso ficou evidente nas respostas finais ao problema proposto, em que a maioria dos grupos demonstrou capacidade de contextualizar os conceitos científicos em situações reais, analisando suas aplicações tanto benéficas quanto destrutivas, como no caso da geração de energia em usinas nucleares e o uso de bombas atômicas em conflitos armados.

Além disso, a metodologia se mostrou eficaz no desenvolvimento das habilidades argumentativas dos(as) estudantes. Ao serem instigados a formular hipóteses, pesquisar, debater e representar os fenômenos estudados, os(as) alunos(as) foram desafiados a refletir sobre seu próprio processo de aprendizagem, assumindo papel ativo em sua formação. Essa abordagem está em consonância com os fundamentos teóricos da resolução de problemas.

Embora tenham sido identificadas lacunas conceituais, especialmente quanto à representação da radioatividade e à identificação precisa de partículas envolvidas nos processos nucleares, os avanços registrados atestam o potencial formativo da sequência didática. A trajetória investigativa favoreceu o protagonismo dos(as) estudantes e ressignificou o ensino da Química como campo de conhecimento contextual e conectado aos desafios do mundo contemporâneo.

Dessa forma, evidencia-se que a metodologia de resolução de problemas contribuiu não apenas para a aprendizagem de objetos de conhecimento, mas também para o desenvolvimento de uma postura crítica, reflexiva e participativa por parte dos(as) estudantes. Ao promover o diálogo entre teoria e prática, ciência e sociedade, conhecimento e ação, a resolução de problemas revelou-se uma metodologia de ensino potente para a construção de uma educação científica mais democrática, transformadora e significativa.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. A., GAZINEU, M. H. P., LEITE, L. F. C. C., AQUINO, K. A. S. A Radioatividade no Cotidiano: atividade com educandos do Ensino Médio. **Experiências em Ensino de Ciências**. v. 13, n. 4, p. 160-169, 2018.

BATINGA, V. T. S. **Abordagem de Resolução de Problemas por Professores de Química do Ensino Médio: um estudo de caso sobre o conteúdo de estequiometria**. 2010. 284 f. Tese (Doutorado em educação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 2010.

BECKER, F. O Que é construtivismo? **Revista de Educação**, v. 21, n. 83, p. 7-15, 1992.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Curricular Comum**. Brasília, 2018.

BRITO, E. S. **Radioatividade no Ensino Médio em uma Abordagem Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS)**. 2019. 136 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Gestão de Ensino da Educação Básica) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

CARDOSO, E. M. **Energia Nuclear e Suas Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CNEN, 2012.

CECELOTTI, L.; MARQUES, D. M. História da Ciência e Ensino: um material paradidático para o ensino de emissões radioativas. **História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces**. v. 27, especial, p. 480-491, 2023.

CNEM. **História da Energia Nuclear**. Rio de Janeiro: CNEN, s.d.

DIAS, M. S.; FERNADES, L. S.; CAMPOS, A. F. Uma meta-análise qualitativa das pesquisas sobre radioatividade no Brasil. **Revista Dynamis**, v. 29, n. 2, p. 192–209, 2023.

DAMASIO, F.; TAVARES, A. **Perdendo o medo da radioatividade**: pelo menos o medo de entendê-la. São Paulo: Autores Associados, 2010.

DAMIANI, M. F.; ROCHEFORT, R. S.; CASTRO, R.F.; DARIZ, M. R.; PINHEIRO S. S. Discutindo Pesquisas do Tipo Intervenção Didática. **Caderno de Educação FAE-UFPEL**, n. 54, p. 57-67, 2013.

Fernandes, D. **Rubricas de Avaliação**. Lisboa: Ministério da Educação, 2021.

FERNANDES, L. S.; CAMPOS, A. F. Tendências de pesquisa sobre a resolução de problemas em Química. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 16, n. 3, p. 458-482, 2017.

FREITAS, A. P. **Resolução de problemas no ensino de química: Reflexões sobre a divulgação científica e a formação continuada de professores**. 2022, 199p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE 2022.

FREITAS, A. P.; BATINGA, V. T. S. CAMPOS, A. F. Pesquisas sobre Resolução de Problemas em Química: uma análise em periódicos científicos. **Revista Brasileira de Ensino de Química**, v.12, n.1, p. 1-21, 2017.

GOI, M. E. J.; SANTOS, F. M. T. A construção do conhecimento químico por estratégias de resolução de problemas. *In: IV Encontro nacional de pesquisa em educação em ciência, Atas*. Porto Alegre: UFRGS, p. 1-12, 2004.

LEITE, L; AFONSO, A. S. Aprendizagem baseada na resolução de problemas características, organização e supervisão. **Boletín das Ciencias**, p. 256-258, 2001.

LEITE, L.; ESTEVES, E. Ensino orientado para a aprendizagem baseada na resolução de problemas na Licenciatura em Ensino de Física e Química. *In: Actas do Congresso Galaico - Português de Psicopedagogia. Anais eletrônicos*. Braga: Universidade do Minho, 2005.

LOPES, R. M.; FILHO, M. V. S.; ALVES, N. G. **Aprendizagem Baseada em Problemas**: fundamento para aplicação no Ensino Médio e formação de professores. 1.ed. Rio de Janeiro: Publiki, 2019.

LOPES, B. R.; COUTINHO, H. N.; RODRIGUES, J. M.; TOLEDO, E. J. L. Radioatividade: entre o bem e o mal. **Química Nova na Escola**. São Paulo, v. 46 n. 1, p. 13-21, 2024.

MACHADO, A. H. **Aula de Química: discurso e conhecimento**. 1999. 149 f. Tese (Doutorado em educação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 1999.

MARTINS, J. L. C. Radioatividade: do bem ou do mal? **Revista Insignare Scientia**, v. 2, n. 3, p. 173-1181, 2019.

MARTINS, R. A. **Como Becquerel não descobriu a radioatividade**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 7, p. 27-45, 1990.

MERÇOM, F.; QUADRAT, S. V. Radioatividade e História do Tempo Presente. **Química Nova na Escola**. São Paulo, n. 19, p. 27-30, 2004.

MEHÉUT, M.; PSILLOS, D. Sequências de ensino-aprendizagem: objetivos e ferramentas para pesquisa em educação científica. **International Journal of Science Education**, n. 26, n. 5, p. 515-535, 2004.

MEIRIEU, P. **Aprender... Sim, mas como?** 7 ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 1998.

MORTIMER, E. F.; MACHADO, A. H.; ROMANELLI, L. I. A Proposta Curricular de Química do Estado de Minas Gerais: fundamentos e pressupostos. **Química Nova**, v. 23, n. 2, p. 273-283, 2000.

PERNAMBUCO. Secretaria de Educação e Esportes. **Curriculo de Pernambuco: Ensino Médio**. Pernambuco, 2021.

OKUNO, E. **Radiação**: efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PASSOS, M. H. S.; SOUZA, A. A. **Química Nuclear e Radioatividade**. 2. ed. Campinas: Átomo, 2012.

POZO, J. I. **A Solução de Problemas**: Aprender a resolver, resolver para aprender. Porto Alegre: Artmed, 1998.

POZO, J. I.; CRESPO, M. Á. G. **A Aprendizagem e o Ensino de Ciências**: do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

RIBEIRO, D. C. A.; PASSOS, C. G.; SALGADO, T. D. M. A metodologia da resolução de problemas no Ensino das Ciências: as características de um problema eficaz. **Revista Ensaio**, v. 22, p. 01-21, 2020.

RIBEIRO, L. R. C. **Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL)**: uma experiência no Ensino Superior. São Carlos: EdUFSCar, 2010.

SCHNETZLER, R. P.; ARAGÃO, R. M. R. Importância, sentido e contribuições de pesquisas para o ensino da Química. **Revista Nova na Escola**, n. 1, p. 27-32, 1995.

SILVA, F. C. V. **Resolução de uma situação-problema sobre radioterapia para construção de conceitos de radioatividade no ensino superior de química**. 2013. 115 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ensino das Ciências) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.

SILVA, F. C. V.; CAMPOS, A. F.; ALMEIDA, M. A. V. Alguns aspectos do ensino e aprendizagem de radioatividade em periódicos nacionais e internacionais. **Amazônia - Revista de Educação em Ciências e Matemáticas**, v. 10, p. 46-61, 2013.

SILVA, E. L.; WARTHA, E. J. Estabelecendo relações entre as dimensões pedagógicas e epistemológicas no Ensino de Ciências. **Ciência & Educação**, v. 24, n. 2 p. 337-354, 2018.

TAVARES, O. A. P. 80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para humanidade. **Revista Ciência e Sociedade**, v. 2, n. 6, p. 19-34, 2019.

APÊNDICE A - RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA				
Desempenho na Resolução do Problema				
SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA PROPOSTO	CRITÉRIOS	NÍVEIS DE DESEMPENHO		
		Insatisfatório	Parcialmente Satisfatório	Satisfatório
E.1 - Olá, geração futura. Venho através dessa alertar sobre o uso de materiais nucleares, pois armas/bombas nucleares trás um poder político e social para um país, como a Rússia, mas é um “poder” que é alimentado pelo medo de acontecer o que aconteceu em uma pequena cidade do Japão na qual teve várias mortes inocentes, só por um teste. Então é um é algo é estar sendo utilizado para o mal. A bomba ela é um mecanismo bem elaborado, pois bomba só é acionada com uma temperatura específica e uma distância em metros do chão. Para haver a explosão.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.2 - Olá você que está lendo essa carta leia com atenção pois o que irei relatara aqui é algo muito sério e eminente. A um processo silenciosos acontecendo, a fabricação e desenvolvimento de bombas, mas não qualquer, uma nuclear capaz de devastar e destruir qualquer coisa que atinge com capacidade destrutiva forte e intensa supera a ponto de deixar marcas profundas no DNA devido	Fenomenológico	X		

<p>ao contato com a radiação que é o principal perigo. podendo modificar não somente o DNA como outras partes do corpo deixando sequelas e doenças graves e má formação em recém nascidos.</p> <p>Trabalhadas em laboratórios em áreas privadas ou abertas são realizados testes práticos a fim de analisar sua potência e poder destrutivo, usando elementos químicos e físicos com a ajuda da tecnologia para serem usados como armamento, o problema está no interesse dessas armas altamente potentes e perigosas, principalmente se caírem em mãos erradas e seus interesses, É importante ter conhecimento disto tanto em vista a repercussão, preocupação e os impactos, é importante estar atento e preparado.</p>	Teórico	X		
	Representacional	X		
<p>E.3 - Olá, querido leitor. Essa carta é um aviso.</p> <p>Vocês estão em perigo, uma guerra nuclear está para acontecer devido a alguns fatores. No entanto, é necessário atenção.</p> <p>Essa ameaça armamentista pode causar grandes desastres em segundos e alcançar</p>	Fenomenológico	X		

<p>quilômetros. As bombas nucleares contêm substâncias químicas, que quando programada (IA) esquentam a parte traseira e aí que começa. Exemplo: a bomba de Chernobyl. Após a bomba ser lançada o céu ficou preto de fumaça, onde a bomba explodiu apareceu uma luz forte vermelha por conta da radioatividade de bombas nucleares aconteceu. Como? Onde a radioatividade teve dificuldade de passar, ficou marcado com uma sombra. Com o pouco do que trouxe no texto pode-se perceber que o assunto é mais que sério.</p>	Teórico	X		
	Representacional	X		
<p>E.4 - As bombas nucleares são uma ameaça armamentista para o planeta, onde a possibilidade de uma guerra nuclear por causa das guerras pelo mundo. Como foi trabalhado em sala um exemplo de um desastre por conta de uma bomba nuclear foi em Hiroshima onde a bomba <i>fat man</i> foi lançada de um avião que em poucos minutos tudo virou pó, por causa da bomba.</p>	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		

E.5 - Querido neto, Você não sabe o quanto é perigoso viver em uma época de ameaça armamentista nuclear, o medo que é viver nessa situação. Vivenciei de perto essa guerra nuclear e o momento que uma grande bomba foi usada em um país vizinho. É horrível o que aconteceu naquele país, pessoas mortas, desespero e principalmente o medo de que a qualquer momento pode ser o seu território. Eu descobrir que o governo faz essas bombas como forma de amedrontar o mundo e países inimigos como forma de "se me atacar, eu tenho uma bomba".	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.6 - Lembre-se que nesse processo de amedrontar, não acontece só nas bombas. A época que vivi era muito difícil, triste e humilhante eu vivia sendo perseguido, essa época de guerra era destruidora. O benefício de vocês, é não repetir esse mundo de destruição mais.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.7. - Vamos iniciar como uma bomba atômica funciona em algumas partes? Todas as bombas têm um determinado minuto e horário e área calculada a distância e a velocidade para ser lançada. Ensino básico são os átomos! Se não me falha a memória quando um átomo se	Fenomenológico	X		

<p>choca com seu núcleo ou com outro acaba tendo uma cadeia de reação, essas reações acabam em explosões absurdas /catastróficas, capazes de congelar um relógio.</p> <p>As coisas mais absurdas é como essa belezinha teve avanços absurdos durante os anos.</p> <p>A bomba quando explodida em Hiroshima nem sequer chegou ao chão direito e quando o tempo acabou eliminou uma camada espessa de temperaturas absurdas dizimando uma grande área.</p>	Teórico	X		
	Representacional	X		
<p>E.8 - Eu? Mas onde são testadas? R. a maioria das bombas nucleares são testadas no mar? Uma área que foi usada foi aquela que ate deu inspiração ao criador do Bob Esponja, essa área testada anos atrás é proibida para banho, pelos riscos a saúde.</p>	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
<p>E.9 - A questão das bombas pode ser ativada por questões ambientais como as mudanças climáticas ou até para provocar uma guerra, já que temos uma grande “preocupação” com a guerra da Ucrânia. (não tenho muito conhecimento sobre o assunto).</p>	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		

E.10 - Tenho um conhecimento muito básico sobre esse assunto. O processo da bomba nuclear é único porque é usado urânio e as normas já não tem tanta força como ela. Por exemplo, a bomba <i>little boy</i> (não sei se a escrita está certa) para uma bomba normal não chega nos pés dele a bomba normal ele explode em espaço desejado específico, já a outra ela pega uma cidade inteira. O benefício é só para se defender nos últimos estantes, porque ela é muito perigosa já que em alguns segundos ela destrói uma cidade inteira, fora as mortes que são em alguns segundos também. Então o processo futuro pra ser utilizado é bem ruim, pode ter várias mortes se destruir uma cidade. A bomba só é acionada em determinado tempo que a pessoa	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.11 - “os ponteiros seguem perto do dia do juízo final”. Lembra muito sobre a bomba <i>fat man</i> e <i>little boy</i> de Hiroshima e Nagasaki (não sei como escreve) onde causaram destruição e tristeza e a bomba quando foi lançada de tanta rapidez ativada os ponteiros ficaram em hora exata. Deixando só o medo e os gritos. Eu não sei bem como funciona então não posso falar/relatar.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		

E.12 - As bombas nucleares são um grande risco, pois após ser ativadas e atingir uma certa área, ele se torna inabitável, devido as substâncias que contém nessas bombas. Elas são ativadas por meio de um temporizador antes de chegar em terra firme.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.13 - A existência de armas de destruição em massa é uma questão relevante e de grande preocupação, não apenas desesperador, mas também fundamental falar sobre nos tempos atuais. Um dos mecanismos principais das bombas atômicas é baseado em aumentar e potencializar sua capacidade de destruição e intimidação de países rivais e militarista, o que é extremamente ameaçador e destrutivo para população e culturas diversas que precisam ser asseguradas e preservadas.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.14 - A única coisa que eu sei sobre essa bomba é que ela explode antes mesmo de tocar o chão. Assim ela explode faz um clarão enorme e um barulho grande. Causa danos terríveis, muitas mortes e o local onde essa bomba explode fica tóxico e por isso fica inabitável.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		

E.15 - Elas são lançadas e nesse processo elas sofrem uma reação química antes de atingir o solo, por meio de um temporizador. Podemos ver a questão do temporizador nas torradeiras e outras coisas. Os riscos são: destruição, abuso de poder e guerras. Benefícios: ajuda de uma forma na política.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.16 - Não tenho conhecimento sobre o assunto.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.17 - Para as gerações futuras, tenham cuidado com as bombas nucleares, pois elas armazenam substâncias que não só afetam a humanidade, como o ambiente, são tóxicas e bastante perigosas. Mantenham sempre distantes e atentos.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.18 - Não tenho conhecimento, mas sei dos riscos que podem acontecer como radiação, efeitos	Fenomenológico		X	

ambientais etc. porque existe um processo que não estou enganado é fissão nuclear. Não lembro o que seja, mas sei que faz parte do processo.	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.19 - Uma bomba funciona através do processo de fissão nuclear. Isso acontece com o núcleo de um átomo pesado como urânio	Fenomenológico		X	
	Teórico		X	
	Representacional	X		
E.20 - É um dispositivo explosivo que libera uma energia por uma reação química e faz uma destruição rápida.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.21 - Por meio desta carta venho alertá-los as ameaças significativas de uma bomba nuclear, sabendo do grande impacto causado pelo homem, as bombas estão cada vez mais fortes, causando assim, impactos irrecuperáveis, causando vários desastres.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		

E.22 - Bombas nucleares a meu ver não há nenhum benefício, pois as consequências são grandes e terríveis, acabando com nosso planeta. Esse é o maior risco. Os processos que acontecem nas bombas nucleares, não têm conhecimento, posso até ter estudando, mas não lembro nesse momento.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.23 - Não tenho conhecimento proveio sobre esse assunto, mas sei que para a bomba detonar precisa acontecer a reação de quebra de partículas.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.24 - O processo que acontece com a bomba nuclear é a fusão nuclear.	Fenomenológico		X	
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.25 - Não tenho conhecimento pelo assunto, eu só ouvi falar uma vez sobre o assunto e não lembro.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.26 - Não tenho conhecimento sobre o assunto! Até assistir um	Fenomenológico	X		

vídeo, mas não sei explicar sobre.	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.27 - Eu não tenho conhecimento no assunto, mas isso pode prejudicar o mundo.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.28 - Eu tenho conhecimento que na bomba que ocorreu em Hiroshima e Nagasaki, essa bomba explodiu antes mesmo de chegar ao solo, essa bomba atômica fez com que os seres humanos se evaporassem e só sobrou as sombras das pessoas, e automaticamente quando a bomba explodiu e o céu ficando laranja. Eu vi isso em um vídeo.	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
	Representacional	X		
E.29 - Não conheço muito sobre bombas nucleares, porém precisamos tomar cuidado por conta da força e do poder e do problema que isso pode causar, como em Hiroshima e Nagasaki, e naquela época ainda estava começando o teste de bombas	Fenomenológico	X		

<p>nucleares, imagina hoje em dia, e em gerações futuras é importante saber disso, sabendo o assunto podemos ter uma forma maior de defesa, preparativos para o ocorrido e defesa para futuras guerras, a força de uma bomba nuclear é altamente nítida. Nem chega a cair no chão, ele explodiu por causa da temperatura que chegou ao limite causando uma destruição em massa, então é importante saber do assunto para prevenções futuras.</p>	Teórico	X		
	Representacional	X		
<p>E.30 - As bombas são graves e se tivesse poderia ser drástica pelo fato de experiências que já vimos em outros países. As bombas tem um processo, mas só sei como é para soltar ela. Não sei como se faz. Mas para soltar é só ligar o cronômetro, abrir a caixa e normalmente ela está em um avião. Não sei se são princípios. Pra mim a única possibilidade é não arrumar briga com ninguém, por que em bomba pra jogar de volta a gente tem.</p>	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
<p>E.31 - Olá, queridos amigos do futuro! Vim alertá-los sobre uma possível “corrida armamentista nuclear” que será disputada através de bombas nucleares. Mas o que são essas talas bombas nucleares?</p>	Representacional	X		
	Fenomenológico	X		

<p>São bombas com alto poder de destruição e vários componentes químicos, alguns perigosos. Quando você estuda sobre “Hiroshima e Nagasaki” verão o poder dela, e hoje em dia deve ser ainda maior.</p> <p>A química é muito ampla, então esses componentes da bomba podem ser encontrados em outras aplicações (até onde sei) e os riscos são vários, como guerras totalmente destrutivas.</p>	Teórico	X		
	Representacional	X		
<p>E.32 - Os processos para se fazer bombas nucleares são bem compostos, eu creio. O principal processo deve ser o uso de plutônio, que é a “arma” principal da bomba.</p> <p>Creio que esses processos são princípios exclusivos para a criação das bombas. São componentes perigosos, tanto físicos, quanto químicos, que caso ocorra uma “junção” pode ser algo devastador.</p>	Fenomenológico	X		
	Teórico	X		
<p>Os riscos são variados, em questão de saúde, população, economia etc.. As consequências do uso das bombas são enormes.</p> <p>Benefício eu acho que não há.</p>	Representacional	X		

APÊNDICE B – PRODUTO EDUCACIONAL

SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE RADIOATIVIDADE BASEADA NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS



SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE RADIOATIVIDADE BASEADA NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS



Mestrando: Márcio Lucas Ferreira Maia
Orientador: Prof. Dr. Lucas dos Santos Fernandes
Coorientadora: Profa. Dra. Ângela Fernandes Campos

RECIFE-PE
2025

Material vinculado à dissertação “SEQUÊNCIA DE ENSINO
E APRENDIZAGEM BASEADA NA RESOLUÇÃO DE
PROBLEMAS PARA O ESTUDO DE RADIOATIVIDADE NO
ENSINO MÉDIO”, do Programa de Mestrado Profissional em
Química em Rede Nacional.

SUMÁRIO



Apresentação.....	4
Competências BNCC.....	6
Habilidades BNCC.....	6
Problema Proposto.....	7
Aula 1 – Avaliação Diagnóstica.....	9
Aula 2 – Discussão e Reflexão.....	11
Aula 3 – Pesquisa Bibliográfica.....	13
Aula 4 e 5 – Aula Expositiva.....	16
Aula 6 – Atividade com Simuladores.....	19
Aula 7 – Atividade Lúdica.....	21
Aula 8 – Reapresentação do Problema.....	23
Links de Acesso.....	25
Considerações Finais.....	26
Referências Bibliográficas.....	28



APRESENTAÇÃO



A radioatividade, fenômeno natural relacionado à emissão espontânea de partículas por núcleos atômicos instáveis, é tema central em discussões científicas e tecnológicas da atualidade, especialmente por sua ligação com a produção de energia e os riscos envolvidos em armamentos nucleares. Entre os processos associados, destacam-se a fissão e a fusão nuclear, ambos relevantes para compreender o potencial e os desafios do uso dessa energia. No entanto, o ensino de radioatividade no Ensino Médio ainda enfrenta obstáculos significativos, como a complexidade dos conceitos, a escassez de materiais didáticos adequados e a necessidade de alinhar o conteúdo às competências da BNCC.

Nesse contexto, o e-book *Sequência Didática para o Ensino de Radioatividade Baseado na Resolução de Problemas* foi desenvolvido como uma proposta pedagógica inovadora, com linguagem acessível e estrutura orientada à prática docente. Seu objetivo é auxiliar professores de Química a tornar o ensino mais atrativo, promovendo o protagonismo estudantil e a construção significativa do conhecimento.

A proposta baseia-se na metodologia da resolução de problemas, uma abordagem ativa que estimula o pensamento crítico, a investigação e o raciocínio criativo, aproximando os conteúdos científicos da vivência dos estudantes. A sequência didática organiza-se em etapas articuladas: diagnóstico inicial, discussão orientada, pesquisa teórica, aula expositiva com apoio de vídeos, atividades práticas com simuladores, dinâmicas lúdicas e, por fim, a retomada da situação-problema. Essa última etapa permite aos estudantes aplicar, de forma fundamentada, os conhecimentos adquiridos ao longo do processo.

O problema gerador da sequência gira em torno da ameaça de conflitos nucleares no cenário geopolítico atual, trazendo à tona reflexões sobre os riscos das armas nucleares e seu impacto global. Tal abordagem visa ampliar o engajamento dos alunos, conectando o conteúdo escolar a temas socialmente relevantes.

Concluímos, portanto, que a abordagem didática proposta não apenas facilita o ensino da radioatividade, como também potencializa a formação crítica dos estudantes diante dos desafios do mundo contemporâneo. Trata-se de uma estratégia que alia conhecimento, contextualização e protagonismo, elementos essenciais para uma educação científica de qualidade.



COMPETÊNCIA BNCC



Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).



HABILIDADES BNCC



(EM13CNT101) Analisar e representar, com ou sem o uso de dispositivos e de aplicativos digitais específicos, as transformações e conservações em sistemas que envolvam quantidade de matéria, de energia e de movimento para realizar previsões sobre seus comportamentos em situações cotidianas e em processos produtivos que priorizem o desenvolvimento sustentável, o uso consciente dos recursos naturais e a preservação da vida em todas as suas formas.

(EM13CNT103) Utilizar o conhecimento sobre as radiações e suas origens para avaliar as potencialidades e os riscos de sua aplicação em equipamentos de uso cotidiano, na saúde, no ambiente, na indústria, na agricultura e na geração de energia elétrica.

(EM13CNT104) Avaliar os benefícios e os riscos à saúde e ao ambiente, considerando a composição, a toxicidade e a reatividade de diferentes materiais e produtos, como também o nível de exposição a eles, posicionando-se criticamente e propondo soluções individuais e/ou coletivas para seus usos e descartes responsáveis.

PROBLEMA PROPOSTO



De acordo com artigo publicado na BBC News em 24 de janeiro de 2024, o “Relógio do Juízo Final”, que mostra quão simbolicamente próximo o mundo estaria de um apocalipse, vai seguir marcando 90 segundos para meia-noite – mesmo horário do ano passado. Os cientistas responsáveis pelo projeto listaram os motivos pelos quais os ponteiros seguem perto do “Dia do Juízo Final”. Ameaçam de uma nova corrida armamentista nuclear, a guerra da Ucrânia e as preocupações com as mudanças climáticas são os principais fatores, segundo eles... desde 2007, os cientistas têm considerado os impactos de novos riscos provocados pelo homem, como inteligência artificial (IA) e as mudanças climáticas, além da maior ameaça de todas: a guerra nuclear. Acredita-se que possibilidade de uma guerra nuclear é iminente e pode causar desastres irrecuperáveis para o planeta e a população, transcendendo fronteiras e gerações, visto que uma análise crítica dessas tecnologias revela um cenário complexo, permeado por considerações éticas, políticas e sociais.

Diante dessa problemática de ameaça armamentista nuclear, você é desafiado a investigar os processos físicos e químicos que ocorrem nas bombas nucleares com o objetivo de relatar, através de uma carta para sua geração e para as gerações futuras, que desconhecem esta temática, aspectos relevantes destes processos, como a descrição desses mecanismos, os benefícios, as ameaças e possibilidades futuras. Dessa forma, para escrever a carta com a problemática em questão, segue alguns questionamentos que devem ser levados em consideração: Quais os processos que acontecem nas bombas nucleares? (descreva-os através de textos e desenhos). Esses processos são princípios exclusivos das bombas nucleares ou podemos verificar em outras aplicações? Quais os riscos e benefícios e possibilidades futuras das aplicações destes processos?

AULA 1 - AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA

50 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Analisar os conhecimentos prévios dos estudantes do 3º ano do ensino médio, participantes da pesquisa, sobre conceitos e aplicações da Fissão e Fusão Nuclear

MATERIAL DIDÁTICO:

1. Fichas para apresentação do problema proposto e para anotações dos estudantes.

METODOLOGIA:

- 1- Entrega do problema proposto aos estudantes;
- 2- Leitura do problema proposto;
- 3- Entrega das cartas pelos estudantes;
- 4- Leitura e reflexão das concepções prévias.

ORIENTAÇÕES:

No início da aula, o professor deverá entregar aos estudantes do 3º ano do Ensino Médio uma ficha contendo o problema proposto para a sequência didática, construído com base nas características de um problema eficaz, conforme proposto por Ribeiro et al. (2020). Em seguida, o professor realizará a leitura do problema em conjunto com a turma, esclarecendo possíveis dúvidas e incentivando a participação ativa dos estudantes. Após a leitura e discussão inicial, os alunos deverão registrar suas concepções prévias sobre os conceitos e aplicações da fissão e fusão nuclear na própria ficha entregue. Essas anotações deverão ser entregues ao final da aula e, caso o professor julgue pertinente, os estudantes também poderão ser convidados a apresentar oralmente as ideias registradas, promovendo um momento de compartilhamento e reflexão coletiva. Esta estratégia visa identificar os conhecimentos prévios da turma, fornecendo subsídios para a condução das etapas seguintes da sequência didática.



AULA 2 - DISCUSSÃO E REFLEXÃO

50 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Identificar e compreender os processos físicos e químicos envolvidos no funcionamento das bombas nucleares;
2. Analisar criticamente as implicações éticas, políticas e sociais da ameaça nuclear;
3. Desenvolver a habilidade de questionamento e argumentação baseada em evidências científicas;
4. Articular suas ideias de forma estruturada, colaborando na construção do conhecimento;
5. Relacionar os processos nucleares com outras aplicações tecnológicas.

MATERIAL DIDÁTICO:

- ✓ Fichas para anotações dos estudantes.

METODOLOGIA:

1. Divisão dos grupos (5 estudantes por grupos);

11

2. Leitura do problema proposto;
3. Discussão e reflexão sobre o problema proposto;
4. Entrega de material com anotações de palavras-chave e questionamentos levantados.

ORIENTAÇÃO:

Nesta fase, será apresentado o problema central aos estudantes, que serão organizados em grupos de cinco integrantes para realizar a análise crítica e a discussão do problema proposto. Durante essa etapa, os alunos focarão na identificação de pontos-chave e na elaboração de possíveis questionamentos para reflexão aprofundada. Essa etapa buscará proporcionar um ambiente colaborativo que estimula o pensamento crítico e a interação entre os participantes.

Durante essa etapa, será avaliada a habilidade dos alunos em identificar pontos-chave e levantar questionamentos relevantes, incentivando uma reflexão crítica. A capacidade de trabalhar colaborativamente e articular ideias de maneira lógica deverá ser levada em consideração, especialmente em termos de compreensão teórica dos processos nucleares.



AULA 3 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

50 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Identificar e compreender os processos físicos e químicos envolvidos no funcionamento das bombas nucleares;
2. Desenvolver a autonomia dos estudantes na busca, análise e interpretação de fontes acadêmicas confiáveis sobre o tema proposto.
3. Desenvolver a habilidade de questionamento e argumentação baseada em evidências científicas;
4. Articular suas ideias de forma estruturada, colaborando na construção do conhecimento;

MATERIAL DIDÁTICO:

1. Plataformas de pesquisa acadêmica;
2. Links diretos para artigos, livros digitais e materiais de referência;
3. Fichas de leitura para anotações e resumos dos textos pesquisados.

METODOLOGIA:

1. Divisão dos grupos (5 estudantes por grupos);
2. Entrega dos links para pesquisa;
3. Anotações pertinentes;
4. Discussão.

ORIENTAÇÕES:

Com base nas discussões e reflexões conduzidas na etapa dois desta sequência de ensino e aprendizagem, os estudantes, sob a orientação do professor, realizarão pesquisas em artigos e livros que abordem as temáticas de radioatividade, fissão e fusão nuclear. A atuação do professor será fundamental para assegurar a confiabilidade dos materiais utilizados, cabendo a ele indicar fontes seguras e apresentar links que direcionem os estudantes a conteúdos qualificados. Nesse momento, os alunos deverão buscar possíveis respostas para os questionamentos levantados na etapa anterior, aprofundando sua compreensão dos temas propostos.



Para auxiliar na pesquisa, o professor recomendará o uso de fontes confiáveis, como os sites Brasil Escola, Revista Galileu, Guia do Estudante e o Google Acadêmico, que serão apresentados por meio de links para facilitar o acesso direto dos estudantes às plataformas indicadas. A avaliação dessa etapa terá como foco a capacidade de sintetizar informações complexas, a qualidade das fontes selecionadas, bem como a clareza e a precisão na interpretação teórica dos conteúdos pesquisados.

AULA 4 E 5 - AULA EXPOSITIVA

1 HORA E 40 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Proporcionar aos estudantes uma compreensão aprofundada sobre os conceitos fundamentais da radioatividade e suas diversas aplicabilidades, utilizando uma abordagem teórica e visual;
2. Relacionar os conceitos apresentados com os processos de fissão e fusão nucleares por meio de vídeos educativos, promovendo uma contextualização mais ampla.

MATERIAL DIDÁTICO:

1. Notebook para reprodução dos vídeos;
2. Resumos com os principais tópicos abordados;
3. Datashow;
4. Caixa de som

METODOLOGIA:

1. Explicação sobre os conceitos e diversas aplicabilidades da radioatividade no cotidiano;
2. Exibição dos vídeos “O que é a Radioatividade? Como ela Funciona?” (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CGar94Wmzh4>) e “Como funciona uma bomba nuclear e por que causa tanta destruição?” (disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=f18W_ITQGa8).
3. Questionamentos do professor para estimular a análise e a reflexão dos estudantes sobre os conteúdos apresentados;
4. Discussão sobre a relação entre os conceitos teóricos e suas representações simbólicas;
5. Verificação da assimilação do conteúdo e aplicação o conhecimento adquirido.

ORIENTAÇÕES:

Nesta etapa da sequência de ensino e aprendizagem, o professor deverá iniciar a aula com uma exposição teórica sobre os conceitos fundamentais da radioatividade, abordando também suas principais aplicações em diferentes contextos. Essa aula expositiva tem como objetivo fornecer aos estudantes uma base conceitual sólida que os ajude a compreender os processos de fissão e fusão nucleares.



Em seguida, o professor apresentará dois vídeos educacionais selecionados por sua relevância e clareza didática. Os vídeos são: *"O que é a Radioatividade? Como ela Funciona?"* (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CGar94Wmzh4>) e *"Como funciona uma bomba nuclear e por que causa tanta destruição?"* (disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=f18W_ITQGa8), ambos disponíveis no YouTube.

Após a exibição dos vídeos, o professor conduzirá um debate com a turma, promovendo a reflexão sobre os principais pontos apresentados e estimulando os estudantes a relacionarem os novos conhecimentos com o problema inicialmente proposto na sequência didática. Durante esse momento, será realizada uma avaliação formativa, com foco na verificação da compreensão imediata dos alunos, considerando tanto a assimilação dos conceitos teóricos quanto a capacidade de relacioná-los às representações simbólicas vistas ao longo das aulas.

AULA 6 - ATIVIDADE COM SIMULADORES

50 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Proporcionar uma experiência interativa com simulações de fissão e fusão nuclear;
2. Favorecer a aplicação dos conceitos de radioatividade em ambiente digital;
3. Ensinar o uso de ferramentas tecnológicas para simular fenômenos físicos;
4. Estimular a reflexão sobre os impactos das simulações em contextos reais;
5. Analisar como os alunos aplicam a teoria ao interagir com o simulador.

MATERIAL DIDÁTICO:

1. Laboratório de informática móvel;
2. Simulador online: Nukemap;
3. Projetor multimídia ou TV;
4. Cadernos ou fichas para registro das observações e respostas às questões propostas pelo professor.

METODOLOGIA:

1. Introdução ao **Nukemap**: como acessar, navegar e utilizar as funcionalidades do simulador;
2. Distribuição de um roteiro de atividades com desafios ou perguntas norteadoras para os alunos explorarem durante a simulação;
3. Registro das observações e reflexões no caderno ou ficha de atividades.

ORIENTAÇÕES:

Neste momento da sequência didática, será utilizado o laboratório de informática da escola, ou outro ambiente que disponha de equipamentos adequados, para a realização de uma atividade prática com o uso de simuladores digitais dos processos de fissão e fusão nuclear. Recomenda-se a utilização da plataforma NUKEMAP, que permite explorar de forma interativa os efeitos de explosões nucleares em diferentes contextos. A avaliação desta etapa considerará o desempenho dos estudantes durante a simulação, bem como a aplicação correta dos conceitos teóricos em um ambiente virtual. A ênfase estará na capacidade dos alunos de converter o conhecimento teórico em ações práticas e fundamentadas, demonstrando compreensão dos fenômenos estudados.



AULA 7 - ATIVIDADE LÚDICA

50 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Estimular a revisão e fixação dos conceitos aprendidos;
2. Promover a troca de conhecimento entre os estudantes;
3. Favorecer a aprendizagem colaborativa.

Tornar o aprendizado dinâmico e envolvente;

4. Fornecer um feedback imediato sobre a compreensão dos alunos.

MATERIAL DIDÁTICO:

1. Dispositivos eletrônicos ;
2. Internet estável ;
3. Projetor multimídia ou TV ;
4. Caixa de som .

METODOLOGIA:

1. Breve revisão dos temas abordados nas etapas anteriores da sequência didática;
2. Explicação sobre o funcionamento do **Kahoot**, regras do jogo e critérios de avaliação;
3. Os alunos são divididos em novos grupos;
4. Cada equipe acessa o Kahoot por meio de seus dispositivos eletrônicos;
5. Discussão final sobre as perguntas do jogo, destacando os erros mais comuns e os conceitos-chave.

ORIENTAÇÕES:

A turma será dividida em grupos, diferentes dos selecionados na etapa 2 desta sequência de ensino e aprendizagem, para realizar uma atividade lúdica de perguntas e respostas através do aplicativo Kahoot. O objetivo de montar equipes diferentes é auxiliar no compartilhamento dos conhecimentos adquiridos no seu grupo de origem com outros estudantes de grupos diferentes. A avaliação desta etapa será baseada na agilidade de resposta, na precisão das respostas e no engajamento dos alunos com o conteúdo, permitindo um retorno imediato sobre seu desempenho.



AULA 8 - REAPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

50 MINUTOS



OBJETIVO:

1. Favorecer a consolidação do conhecimento;
2. Promover o pensamento crítico e a reflexão;
3. Avaliar a aprendizagem e a aplicação do conhecimento.

MATERIAL DIDÁTICO:

1. Ficha do problema inicial;
2. Ficha com as soluções dos problemas;

METODOLOGIA:

1. O professor introduzirá o problema central da sequência didática;
2. Os alunos serão distribuídos em grupos colaborativos, favorecendo a troca de ideias e o desenvolvimento conjunto de soluções ;

3. Com base nas discussões, nas pesquisas realizadas e nos recursos explorados durante a sequência didática, os grupos desenvolverão propostas fundamentadas para a resolução do problema;
4. Cada grupo apresentará suas soluções ao restante da turma, promovendo o debate, a argumentação e a reflexão .

ORIENTAÇÕES:

Após as sete aulas anteriores a esta o professor reapresentará o problema para a turma e os estudantes, em seus grupos de origem, são convidados a apresentarem soluções encontradas para o problema proposto. Neste momento o professor avaliará as respostas baseados da construção do conhecimento na perspectiva de Machado (1999), que através dos níveis fenomenológico, teórico e representacional busca inter-relações entre mundo-linguagem-pensamento como questão epistemológica básica para a construção do conhecimento nas aulas de Química. Assim como descritos na etapa da avaliação diagnóstica.

LINKS DE ACESSO



VÍDEO - "Fusão e Fissão Nuclear: o que é?", do canal ATHEC-INFO:

<https://www.youtube.com/watch?v=OtY6OGuCI4w>

"Como funciona uma bomba nuclear e por que causa tanta destruição?":

https://www.youtube.com/watch?v=f18W_ITQGa8.

Plataforma NUKEMAP:

<https://nuclearsecrecy.com/nukemap/>

Plataforma KAHOOT:

https://kahoot.com/?utm_name=controller_app&utm_source=controller&utm_campaign=controller_app&utm_medium=link

CONSIDERAÇÕES FINAIS



Este e-book foi pensado como um apoio prático para você, professor de Química, que busca novas formas de tornar o ensino da radioatividade mais dinâmico, acessível e conectado com a realidade dos seus estudantes e da atualidade. A sequência didática aqui apresentada não é um modelo engessado — ela serve como ponto de partida e pode (e deve) ser adaptada conforme as necessidades da sua turma, os recursos disponíveis e sua própria didática de ensino. Por isso, sinta-se à vontade para ajustar o que for necessário para que a proposta funcione da melhor forma no seu contexto.

Nosso desejo é que este material possa realmente fazer a diferença no seu dia a dia em sala de aula, ajudando a despertar o interesse dos alunos por um tema tão importante, mas muitas vezes visto como difícil ou distante. Ao propor atividades baseadas na resolução de problemas, queremos incentivar uma aprendizagem mais ativa, crítica e participativa, onde o estudante se sinta parte do processo e construa o conhecimento de forma mais significativa.

Se quiser se aprofundar mais na fundamentação teórica e nas experiências que deram origem a este material, sugerimos a leitura da dissertação completa que acompanha este trabalho. Esperamos que este e-book sirva não só como um guia, mas também como uma inspiração para enriquecer ainda mais suas práticas pedagógicas. Boa sorte e boas aulas!

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Curricular Comum**. Brasília, 2018.

BAHIA, G. C. **Problematização no ensino de biologia com o arco de maguerez: um ebook para professores desenvolvido em contexto amazônico**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Biologia Rede Nacional) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MEHÉUT, M & PSILLOS, D. (2004) Sequências de ensino-aprendizagem: objetivos e ferramentas para pesquisa em educação científica. **International Journal of Science Education**, 26:5, 515-535, DOI:10.1080/09500690310001614762

MORTIMER, Eduardo; MACHADO, Andréa; ROMANELLI, Lilavati. **A proposta curricular de química do Estado de Minas Gerais: Fundamentos e Propostas**. Química Nova, Belo Horizonte, v. 23, n. 2, p.273-283, maio 1999

MORTIMER, E. F., MACHADO, A. H., ROMANELLI, L.I. A Proposta Curricular de Química do Estado de Minas Gerais: Fundamentos e Pressupostos. **Química Nova**, v. 23, n. 2, p. 273-283, 2000.

RIBEIRO, D. C. A.; PASSOS, C. G.; SALGADO, T. D. M. **A metodologia da resolução de problemas no ensino das ciências: as características de um problema eficaz**. Revista Ensaio, v. 22, p. 01-21, 2020.

SANTOS, M. V. L. **E-book multimídia-interativo como recurso pedagógico digital para o ensino de biotecnologia**. 2022. 101 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Biologia Rede Nacional) - Universidade Federal DE Juiz de Fora, Governado Valadares, 2022.

