



Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências



VITOR BEZERRA LADEIRA

**UM ESTUDO DOS INVARIANTES OPERATÓRIOS
MOBILIZADOS POR ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO SOBRE
RADIOATIVIDADE**

Campo Grande - MS
2025

VITOR BEZERRA LADEIRA

**UM ESTUDO DOS INVARIANTES OPERATÓRIOS MOBILIZADOS POR
ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO SOBRE RADIOATIVIDADE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências, sob orientação da Prof^a Dr^a Lisiane Barcellos Calheiro

Área de Concentração: Ensino de Ciências Naturais.

Linha de Pesquisa: A construção do conhecimento em Ciências.

Campo Grande - MS
2025

UM ESTUDO DOS INVARIANTES OPERATÓRIOS MOBILIZADOS POR
ESTUDANTES DO ENSINO MÉDIO SOBRE RADIOATIVIDADE

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como requisito para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Lisiane Barcellos Calheiro
Orientadora/UFMS

Prof. Dr. Leandro Londero da Silva
Membro Externo/UNESP

Prof.^a Dr.^a Fernanda Zandonadi Ramos
Membro Interno/UFMS

Prof.^a Dr.^a Carla Beatriz Sphor
Membro Externo/ UNIPAMPA

Campo Grande - MS
2025



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS
MESTRADO

Aos vinte e oito dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, às quatorze horas e trinta minutos, foi realizado, na Videoconferência da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, o Exame de Defesa do aluno Vitor Bezerra Ladeira RGA 202300167, CPF nº 05856061101, apresentado sob o título "**Unidade de ensino à luz da Teoria dos Campos Conceituais para o estudo da Radioatividade no Ensino Médio**", e orientação de Lisiane Barcellos Calheiro. A presidente da Banca Examinadora declarou abertos os trabalhos e agradeceu a presença de todos os Membros. A seguir, concedeu a palavra ao aluno que expôs sua Dissertação. Terminada a exposição, os senhores membros da Banca Examinadora iniciaram as arguições. Terminadas as arguições, a presidente da Banca Examinadora fez suas considerações. A seguir, a Banca Examinadora reuniu-se para avaliação, e após, emitiu parecer expresso conforme segue:

EXAMINADOR:

Dra. Lisiane Barcellos Calheiro - UFMS (Orientadora / Membro Interno)

Dra. Leandro Londero da Silva - UNESP (Titular/ Membro Externo)

Dra. Fernanda Zandonadi Ramos - UFMS (Titular/ Membro Interno)

Dra. Daniele Correia - UFMS (Suplente/ Membro Interno)

Dra. Carla Beatriz Spohr – UNIPAMPA (Suplente / Membro Externo)

RESULTADO FINAL:

☒	Aprovação	☐	Aprovação com revisão	☐	Reprovação
-------------------------------------	-----------	--------------------------	-----------------------	--------------------------	------------

OBSERVAÇÕES: O texto deverá ser revisado com base nas observações e sugestões apresentadas pela banca examinadora. Recomenda-se, ainda, a alteração do título do trabalho para: "*Um Estudo dos Invariantes Operatórios Mobilizados por Estudantes do Ensino Médio sobre Radioatividade*".

Este é o parecer.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Lisiane Barcellos Calheiro, Professora do Magistério Superior**, em 29/07/2025, às 04:52, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Carla Beatriz Spohr, Usuário Externo**, em 29/07/2025, às 15:25, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Zandonadi Ramos, Professora do Magistério Superior**, em 30/07/2025, às 21:22, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Bezerra Ladeira, Usuário Externo**, em 07/08/2025, às 12:19, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Londero da Silva, Usuário Externo**, em 07/08/2025, às 20:18, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5725874** e o código CRC **4BBBBB37**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades recebidas durante a realização deste trabalho. Sua graça e proteção me acompanharam em cada etapa, permitindo-me superar todos os desafios

Agradeço imensamente à minha mãe, Ana Aldeniza, por todo o amor, apoio e incentivo incondicionais durante toda a minha vida. Sua presença e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sou imensamente grato por ter uma mãe tão especial.

A minha orientadora Lisiane Barcellos, expressei minha profunda gratidão por sua orientação e apoio durante todo este processo. Seus ensinamentos e conhecimentos me proporcionaram a realização deste trabalho. Sua paciência e compreensão foram essenciais para meu crescimento e um dos motivos de seguir para a pós-graduação. Sou imensamente grato por ter tido a oportunidade de aprender com uma profissional tão competente e dedicada.

Agradeço aos meus colegas Vinicius, Amanda e Gustavo pela colaboração e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. As nossas discussões e trocas de ideias foram fundamentais para a construção deste projeto. Acompanhar o trabalho de vocês foi um privilégio e contribuiu significativamente para meu aprendizado.

Ao professor Além-Mar que auxiliou em várias atividades desenvolvidas na implementação da UEPS.

Agradeço a todos os membros do nosso grupo de pesquisa pela colaboração e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço imensamente a todos os estudantes que participaram desta pesquisa. Sua colaboração foi essencial para a obtenção dos resultados e para o sucesso deste trabalho. A disposição de vocês em compartilhar suas experiências e perspectivas foi essencial para este estudo acontecer.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da UFMS pelo importante apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento desta pesquisa. Os recursos disponibilizados para participação no 8º Encontro Nacional da Aprendizagem Significativa contribuíram significativamente para o sucesso deste trabalho.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos, pois me permitiu dedicar-me aos estudos e à pesquisa, contribuindo para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

Após décadas de justificativas para a introdução da Física Moderna e Contemporânea na Física (FMC) no Ensino Médio, os desafios atuais se voltam para como introduzir, na prática, seu conteúdo de forma inovadora integrada ao Novo Ensino Médio. Neste contexto, um dos tópicos de FMC abordados nos documentos oficiais é a radioatividade, que é de grande relevância tanto na vida cotidiana quanto para o próprio ensino da Física, visto que é utilizada em diferentes áreas da Ciência, tais como medicina e produção de energia. Diante disso, esta pesquisa buscou responder à seguinte questão: Como situações-problema utilizadas na implementação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa contribuem para indicar o possível domínio do campo conceitual da Radioatividade de estudantes do 1º ano do Ensino Médio? O objetivo foi analisar esse possível domínio conceitual por meio da resolução de situações-problema com diferentes níveis de complexidade, a partir da implementação de uma UEPS sobre radioatividade, aplicada em uma escola da rede pública estadual. Como referencial teórico ancoramos a nossa pesquisa na Teoria dos Campos Conceituais, buscando investigar o possível domínio do campo conceitual da Radioatividade, a partir dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes para responder às diferentes situações-problema da UEPS. À medida que a sequência foi sendo desenvolvida e as atividades aplicadas, pudemos acompanhar uma transformação significativa na forma como os estudantes lidavam com os conceitos do campo conceitual da radioatividade. Observamos, que progressivamente, deixaram de recorrer a explicações baseadas no senso comum, passando a construir argumentos mais coerentes, fundamentados e alinhados à linguagem científica. Ao final da UEPS, muitos estudantes demonstraram domínio mais elaborado do campo conceitual da radioatividade, utilizando raciocínios causais bem estruturados, evidenciando uma apropriação mais significativa dos conteúdos abordados.

Palavras chave: Radioatividade, UEPS, Teoria dos Campos Conceituais, Ensino de Física.

ABSTRACT

After decades of justifications for the introduction of Modern and Contemporary Physics (MCP) into high school physics curricula, current challenges focus on how to effectively integrate its content into practice in innovative ways aligned with the New High School framework. In this context, one of the MCP topics highlighted in official documents is radioactivity, which is highly relevant both in everyday life and in the teaching of physics itself, as it is applied in various fields of science such as medicine and energy production. In light of this, the present study sought to address the following question: How do problem situations used in the implementation of a Potentially Meaningful Teaching Unit (PMTU) contribute to indicating the possible mastery of the conceptual field of Radioactivity among first-year high school students? The aim was to analyze this potential conceptual mastery through the resolution of problem situations with different levels of complexity, based on the implementation of a PMTU on radioactivity in a state public school. As the theoretical framework, we anchored our research in the Theory of Conceptual Fields, seeking to investigate the possible mastery of the conceptual field of Radioactivity by examining the operational invariants mobilized by students in their responses to the different problem situations presented in the PMTU. As the sequence was developed and the activities applied, we observed a significant transformation in the way students engaged with the concepts of the conceptual field of radioactivity. Progressively, they moved away from explanations rooted in common sense, instead constructing more coherent, evidence-based arguments aligned with scientific language. By the end of the PMTU, many students demonstrated a more elaborate mastery of the conceptual field of radioactivity, employing well-structured causal reasoning that reflected a more meaningful appropriation of the content addressed.

Keywords: Radioactivity, PMTU, Theory of Conceptual Fields, Physics Teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma conforme o protocolo PRISMA 2020.....	23
Figura 2 – Uma visão esquemática do contínuo aprendizagem significativa aprendizagem mecânica de acordo com Moreira (2012)	41
Figura 3 – Escola Estadual Zélia Quevedo Chaves	52
Figura 4 – Escola Estadual José Alves Quito	53
Figura 5 – Atividades implementadas na implementação do projeto piloto	54
Figura 6 – Notícia veiculada pela mídia apresentada aos estudantes	59
Figura 7 – Simulador utilizado na atividade	61
Figura 8 – Estudantes realizando a atividade com o “dominó radioativo”	63
Figura 9 – Imagem dos dados com a face marcada voltada para cima. Tetraedro, 4 lados, amarelo; hexaedro, 6 lados, Cinza; Octaedro, 8 lados, Branco; Dodecaedro, 12 lados, vermelho; e Icosaedro, 20 lados, verde.....	65
Figura 10 – Estudantes realizando a atividade “dados Radioativos”	65
Figura 11 – Recorte da notícia “Chernobyl Brasileiro: Goiás teve um dos piores acidentes nucleares até hoje ”	67
Figura 12 – Recorte da notícia “O que três itens radioativos desaparecidos nos últimos três meses têm em comum?”	68
Figura 13 – Estudantes jogando “Tabuleiro “Radioativo”	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantitativo de trabalhos encontrados em cada base de dados de acordo com o booleano utilizado	21
Quadro 2 – Critérios de inclusão e exclusão dos artigos.....	22
Quadro 3 – Relação dos trabalhos analisados de acordo com sua classificação.....	24
Quadro 4 – Ideias centrais que abrangem a Teoria dos Campos Conceituais	47
Quadro 5 – Comparativo das atividades desenvolvidas no projeto piloto e na implementação final da sequência didática	55
Quadro 6 – Conceitos iniciais para o estudo da radioatividade	60
Quadro 7 – Questões chaves utilizadas durante o passo 4	62
Quadro 8 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de átomo	73
Quadro 9 - Análise dos invariantes operatórios para o conceito de núcleo atômico	76
Quadro 10 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de eletrosfera	78
Quadro 11 - Análise dos invariantes operatórios para o conceito de próton	79
Quadro 12 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de nêutron.....	80
Quadro 13 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de elétron	81
Quadro 14 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de massa atômica. ..	83
Quadro 15 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de número atômico ..	84
Quadro 16 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de carga.....	86
Quadro 17 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de isótopo	88
Quadro 18 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de Átomo Estável/Instável	90
Quadro 19 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de meia vida	91
Quadro 20 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de decaimento radioativo.	93
Quadro 21 – Análise dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes para questão chave do passo 2.....	97
Quadro 22 – Classificação do nível cognitivo dos conceitos de radioatividade e análise dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes para questão 1	100
Quadro 23 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 1	105
Quadro 24 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 2	107
Quadro 25 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 3	110
Quadro 26 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 4	112

Quadro 27 – Analise dos invariantes operatórios para o recorte 5	115
Quadro 28 – Análise dos invariantes operatórios para questão 2	118
Quadro 29 – Analise dos invariantes operatórios para questão 3	120
Quadro 30 – Análise dos invariantes operatórios para questão 4	122
Quadro 31 – Análise dos invariantes operatórios para questão 5	123

LISTA DE SIGLAS

BNCC	Base Nacional Comum Curricular
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
EJA	Educação de Jovens e Adultos
EM	Ensino Médio
FMC	Física Moderna e Contemporânea
HQ	História em quadrinhos
PNLD	Plano Nacional do Livro Didático
TAS	Teoria da Aprendizagem Significativa
TCC	Teoria dos Campos Conceituais
UEPS	Unidade de Ensino Potencialmente Significativa
RSL	Revisão Sistemática da Literatura

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 SELEÇÃO DOS TRABALHOS	20
2.2 ANÁLISE DOS TRABALHOS	23
2.2.1 Análise por Categorias.....	27
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO	38
3. APORTE TEÓRICO	40
3.1 TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	40
3.2 UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA - UEPS	44
3.3 TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS	46
4. ASPECTOS METODOLÓGICOS	52
4.1 CONTEXTO DA PESQUISA	52
4.1.1 Aspectos Éticos da Pesquisa	53
4.2 PROJETO PILOTO	54
4.2.1 Considerações sobre o projeto Piloto	55
4.3 INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	56
4.4 DESCRIÇÃO DA UEPS	57
4.4.1 Passos da UEPS	58
5. RESULTADOS.....	71
5.1 ANÁLISE DO PASSO 2 – QUESTIONÁRIO DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS.....	72
5.1.1 Conhecimentos prévios relacionados à estrutura da matéria.....	73
5.1.2 Conhecimentos prévios relacionados a Radioatividade	97
5.2 ANÁLISE DO PASSO 5 – COMPLEXIDADE.....	104
5.3 ANÁLISE DO PASSO 7 – AVALIAÇÃO INDIVIDUAL SOMATIVA.....	118
5.4 POSSÍVEL DOMÍNIO DO CAMPO CONCEITUAL	125
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
7. REFERÊNCIAS.....	131
ANEXO A – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA	141
ANEXO B – DECLARAÇÃO DE ANUÊNCIA DA INSTITUIÇÃO COPARTICIPANTE	143
APÊNDICE 1 – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO – TCLE.....	145
APÊNDICE 2 – TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO – TALE.....	147

APÊNDICE 3 – SLIDES REFERENTES AO CONTEÚDO DE RADIOATIVIDADE MINISTRADO.....	149
APÊNDICE 4 – ATIVIDADE COM RECORTES DE NOTÍCIAS DESENVOLVIDA COM OS ESTUDANTES.....	151
APÊNDICE 5 – JOGO “TABULEIRO RADIOATIVO”	154
APÊNDICE 6 – SLIDES UTILIZADOS PARA REVISÃO	156

APRESENTAÇÃO

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

Apesar de na época não saber o que essa frase significava, ela já mostrava algo que amava fazer desde a infância. Foi aí que minha jornada em direção ao curso de Física começou. Desde os meus oito anos, eu era fascinado por tecnologia. Desmontar brinquedos e aparelhos eletrônicos para entender seus mecanismos, remontá-los e, às vezes, criar algo novo a partir de suas peças, era minha principal diversão. Esse fascínio pela engenharia esteve sempre comigo.

À medida que crescia, comecei a frequentar *lan houses* e, como muitas crianças da minha geração, meu interesse pela área da computação se intensificou. Por muito tempo, estive convicto de que seguiria uma carreira em Tecnologia da Informação, influenciado por esse ambiente. No entanto, durante o ensino médio, ao me aproximar do momento de decidir minha profissão, percebi que não desejava limitar-me exclusivamente ao mundo da computação. Queria um curso que me proporcionasse conhecimentos em diferentes áreas, como computação e mecânica. Foi nesse ponto que decidi optar pela engenharia, embora ainda não soubesse exatamente qual ramo seguir.

Essa incerteza foi resolvida quando minha escola organizou uma visita à Universidade Católica Dom Bosco (UCDB), que anualmente abre suas portas para estudantes de escolas públicas. Durante a visita, fiquei bastante atraído pela engenharia mecatrônica, pois ela reunia muitos dos elementos que me encantavam desde criança. No mesmo ano, realizei uma prova para essa universidade e consegui uma bolsa de estudos parcial, o que me possibilitou ingressar no curso de engenharia no ano seguinte.

Por dois anos, permaneci no curso de engenharia, mas com o tempo, percebi que não era o que eu esperava. O rumo que a formação estava tomando não correspondia às minhas expectativas, tanto em relação à prática da profissão quanto ao mercado de trabalho, que parecia restrito e pouco promissor para engenheiros recém formados na época. Foi então que comecei a reconsiderar minhas opções e lembrei do curso de Física, que era uma das minhas opções além da engenharia, mas que, na época, não cogitei seguir, pois tudo havia se alinhado para a engenharia. A física, por ser uma área muito

ampla, me daria a liberdade de estudar e trabalhar com diversas áreas que me interessavam, como a computação e a própria engenharia.

Contudo, ainda não sabia se escolheria bacharelado ou licenciatura. Após pensar por um tempo, decidi optar pela licenciatura, por oferecer maiores chances de trabalho. Com o decorrer do curso, acabei me apaixonando pela área da educação, o que me confirmou que fiz a escolha certa.

No último ano de graduação, precisei escolher um orientador para o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Optei pela professora Dra. Lisiane, cuja linha de pesquisa envolvia experimentação no ensino, algo que sempre me atraiu. Juntos, desenvolvemos um aparato para o ensino de cinemática, aplicável nas aulas de Física. Paralelamente, cursei uma disciplina sobre Física Moderna, onde fui introduzido ao estudo das radiações ionizantes, um tema que me interessou muito, já que só tive contato com ele durante a graduação.

Foi nesse período que comecei a considerar a possibilidade de seguir para o mestrado, com a intenção de aprofundar meus estudos. Minha orientadora de TCC me explicou o funcionamento do mestrado e apresentou referenciais teóricos que ela tinha afinidade em trabalhar, e que, por sorte estavam em consonância com meus interesses. Assim, elaborei um pré-projeto com foco em radioatividade e sua relevância para o ensino de Física Moderna, um tema muitas vezes pouco explorado na educação básica e, como no meu caso, estudado apenas no curso superior.

Apesar das incertezas sobre a aprovação no processo seletivo, desenvolvi o projeto, já imaginando a orientação da professora Lisiane. Para minha alegria, na mesma semana em que me formei no curso de Física, recebi a notícia de que havia sido aprovado no programa de pós-graduação. Dois momentos decisivos na minha vida ocorreram simultaneamente, mostrando uma nova fase acadêmica e profissional.

Atualmente atuo como docente na rede estadual de ensino de Mato Grosso do Sul e sou mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da UFMS, onde conduzo uma pesquisa focada no ensino da radioatividade. Dessa forma, sigo alimentando minha paixão, unindo educação, tecnologia e ciência, algo que sempre me fascinou desde a infância, quando desmontava brinquedos para descobrir como funcionavam.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta da radioatividade foi um marco significativo na história da humanidade, revolucionando áreas como a medicina, a geração de energia e a indústria e, ao mesmo tempo, trouxe novos desafios e riscos especialmente no contexto militar e ambiental (Silva, 2019a; Soares, 2016). Atualmente, suas aplicações são amplas e abrangem diversas áreas que envolvem diferentes fenômenos presentes no cotidiano.

Esses estudos têm um impacto na área da medicina, especialmente no diagnóstico e tratamento de doenças. Técnicas como a radiografia, a tomografia computadorizada e a radioterapia utilizam princípios da radioatividade para detectar e tratar condições como o câncer (Silva, 2017b; Silva, 2019c; Naujorks, 2022). No entanto, temas como esse ainda são pouco explorados na Educação Básica, em razão de sua natureza abstrata e da complexidade matemática envolvida. Essa limitação é evidenciada na investigação de Silva Junior e Londero (2019), os quais apontam que, na transposição didática dos conteúdos relacionados aos raios X, é comum ocorrer uma simplificação excessiva do conhecimento, comprometendo sua profundidade conceitual (Moreira, 2021). De acordo com Silva (2017b), abordagens de temas relacionados aos exames de diagnósticos médicos por imagem, como a falta de transparência em relação aos riscos envolvidos nesses procedimentos e a limitação de acesso a exames mais modernos às camadas economicamente menos privilegiadas da sociedade evidenciam a necessidade de refletirmos sobre estas questões.

Outro papel fundamental da radioatividade está na geração de energia. Usinas nucleares utilizam a fissão de materiais radioativos para produzir grandes quantidades de energia elétrica de maneira relativamente limpa e eficiente (De Lira, 2015). De acordo com Gomes et al. (2012), embora exista a possibilidade de acidentes ao longo da vida de uma usina nuclear, está comprovada a eficácia dessas estruturas em desempenhar sua função e produzir energia de maneira significativamente mais limpa.

Entendemos que o estudo da radioatividade e suas aplicações têm uma importância significativa para a Educação Básica, especialmente devido às controvérsias que cercam o tema. De acordo com De Lucena et al. (2017), com o aumento do uso de radiações ionizantes em áreas como medicina, indústria, segurança, engenharia, pesquisa e geração de energia, é fundamental educar a população sobre os principais aspectos dessas aplicações, bem como os riscos e benefícios envolvidos.

Assim, ao abordar o tema, os estudantes não apenas poderão compreender os princípios científicos, mas também serão incentivados a refletir sobre as implicações éticas, ambientais e sociais associadas ao seu uso (Monteiro e Silva, 2020). Essas discussões são fundamentais para formar cidadãos informados e críticos, capazes de participar ativamente em debates e decisões que impactam a sociedade como um todo. Tal abordagem contribui para mitigar o problema de que, frequentemente, as opiniões sobre radiações são apresentadas “com pouco embasamento científico”, o que pode levar a avaliações equivocadas facilmente disseminadas (Gombrade e Londero, 2022, p.288). Dessa forma, torna-se imprescindível que o ambiente escolar acompanhe essas demandas, assumindo um papel ativo na promoção de práticas educativas mais contextualizadas e críticas.

Neste contexto, nos últimos anos vêm ocorrendo reformas nos documentos oficiais que orientam os currículos da Educação Básica. Um dos objetivos dessas mudanças é promover mudanças nas práticas de ensino dos docentes e nas dinâmicas de salas de aula (Santos, 2024). Tais documentos destacam a importância de temas como a física nuclear, as radiações e as tecnologias emergentes, que são importantes para o desenvolvimento das habilidades e conhecimentos necessários no século XXI (Fernandez et al., 2021). Com base nessa perspectiva, propõem uma abordagem dos conceitos científicos com foco no desenvolvimento de habilidades e competências, diferindo da simples apresentação de listas de conteúdo. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) orienta o ensino de Ciências a partir de práticas que promovem a compreensão dos fenômenos e o uso ativo do conhecimento científico:

[...]A elaboração, a interpretação e a aplicação de modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos são aspectos fundamentais do fazer científico, bem como a identificação de regularidades, invariantes e transformações (Brasil, 2018, p. 548).

No que diz respeito ao objeto de estudo desta pesquisa, a BNCC ressalta a importância de incluir tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC), conforme destacado, nas habilidades do componente curricular de Ciências para o 9º ano:

Classificar as **radiações** eletromagnéticas por suas frequências, fontes e aplicações, discutindo e avaliando as implicações de seu uso em **controle remoto, telefone celular, raio X, forno de micro-ondas**, fotocélulas etc; discutir o papel do **avanço tecnológico na aplicação das radiações na medicina diagnóstica (raio X, ultrassom, ressonância nuclear magnética)**

e no tratamento de doenças (radioterapia, cirurgia ótica a laser, infravermelho, ultravioleta etc.) (Brasil, 2018, p. 351). *(grifo nosso)*.

Essa abordagem da FMC permite que os estudantes compreendam melhor os princípios que sustentam as inovações tecnológicas e científicas, além de despertar o interesse por áreas avançadas da Física com aplicações diretas no cotidiano e na indústria.

Sua abordagem, entretanto, é insipiente no Ensino Médio (Naujorks, 2022), pois normalmente esses conteúdos são trabalhados ao final do 3º ano do Ensino Médio, onde estão presentes os conteúdos de Física Moderna ou mais recentemente, também incluídos nas chamadas Unidades Curriculares, nas quais o enfoque se direciona mais ao mundo contemporâneo, explorando a aplicação da Física nas tecnologias atuais. A BNCC apresenta o tema na área da Ciência da Natureza e suas Tecnologias, que sugere “estimular estudos referentes a: [...] fusão e fissão nucleares; espectro eletromagnético; efeitos biológicos das radiações ionizantes; [...]” (Brasil, 2018, p.554), e apresenta em uma de suas habilidades referentes ao Ensino Médio:

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).

No entanto, muitos desses temas contemporâneos ainda são pouco explorados, como pode ser observado na análise dos livros didáticos, onde conteúdos de FMC, quando presentes, aparecem apenas como curiosidades ou de forma deslocada em seções específicas dos livros (Martins Fontes & Rodrigues, 2020). Segundo Silva Júnior e Londero (2022), os manuais escolares de Física frequentemente realizam uma transposição didática que enfatiza as aplicações tecnológicas da radioatividade, mas negligencia os aspectos históricos e epistemológicos da ciência, evidenciando que muitos temas contemporâneos continuam pouco explorados e apresentam um tratamento superficial nos livros didáticos.

Em consonância com o assunto, Pereira et al. (2019) destacam a importância de estudar esse tema:

Vivemos em uma sociedade na qual são utilizados **os conhecimentos científicos relacionados à Física Moderna em diversas áreas**, na saúde com os aparelhos de diagnóstico por imagem como radiografia, mamografia, tomografia computadorizada, ultrassonografia, ressonância magnética, entre outros. Na telecomunicação, com as fibras ópticas que revolucionaram e tornaram mais eficientes as telecomunicações [...] (Pereira; Guerini; Sá-Silva, 2019, p. 107). *(grifo nosso)*.

Portanto, a FMC não apenas explica a base das tecnologias emergentes, como também proporciona uma compreensão mais profunda dos desafios científicos e tecnológicos atuais.

No entanto, observamos que o ensino de Física no Ensino Médio ainda apresenta limitações significativas no que diz respeito à inserção de tópicos de FMC conforme apontada por Calheiro (2014). De acordo com Silva et al. (2017c) o conteúdo referente à radioatividade é pouco abordado no Ensino Médio, o que pode estar relacionado à forma superficial com que o tema costuma ser tratado, geralmente de modo resumido e com pouca profundidade conceitual. Além disso, muitos professores ainda demonstram limitações em relação ao domínio desse conteúdo, o que também compromete sua abordagem em sala de aula (Correia, 2022).

No ensino médio, **a física das radiações**, integrante da física moderna, quase **nunca é ministrada porque às horas-aulas da disciplina de física** já não são suficientes para abranger o programa exigido nas provas de vestibulares, e **também porque os próprios mestres possuem pouco conhecimento nessa área**. [...] (Correia, 2022, p.10). *(grifo nosso)*.

Assim, quando o tema é finalmente abordado, é feito de forma superficial através de cálculos de meia-vida de radioisótopos ou balanceamento de equações nucleares, deixando-se de lado a importância da radioatividade para a sociedade, sua aplicabilidade e os perigos associados (Silva, 2019c). Isso contribui para que a radioatividade seja negativamente mistificada, em grande parte devido à abordagem inadequada e à influência da mídia na interpretação dos fatos históricos relacionados ao tema.

De acordo com Silva Junior e Londero (2022), a aprendizagem dos conceitos de radioatividade desempenha um papel fundamental na compreensão da Ciência e em seu funcionamento de forma mais ampla, pois fornece uma base sólida para entender muitos fenômenos naturais e tecnológicos. Além disso, o estudo da radioatividade é importante para a conscientização e segurança em contextos onde a radiação está presente, como em hospitais, usinas nucleares e laboratórios de pesquisa.

Neste contexto, a pesquisa busca responder à seguinte questão de pesquisa: *Como situações-problema utilizadas na implementação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa contribuem para indicar o possível domínio do campo conceitual da Radioatividade de estudantes do 1º ano do Ensino Médio?*

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar o possível domínio do campo conceitual da radioatividade de estudantes do Ensino Médio, a partir de situações-problema em diferentes níveis de complexidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

Realizar um levantamento bibliográfico nos periódicos da área de Ensino sobre o tema Radioatividade aplicado à Educação Básica.

Elaborar e implementar uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) como proposta metodológica sobre Radioatividade.

Investigar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre o Radioatividade.

Analisar a mobilização de invariantes operatórios relacionados ao campo conceitual da Radioatividade por estudantes do Ensino Médio.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, estruturados conforme segue.

Neste capítulo, introduzimos o tema da pesquisa, delineando o problema a ser investigado e justificando a sua relevância. Também são apresentados os objetivos gerais e específicos do estudo.

No capítulo 2 apresentamos uma revisão sistemática da literatura acerca de como o estudo da Radioatividade tem sido abordado na educação básica, sendo conduzida a partir das seguintes bases de pesquisa: Periódicos CAPES, Scielo, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) e Catálogo de Teses e Dissertações (CAPES).

O capítulo 3 descreve o aporte teórico que fundamenta a pesquisa e orienta o desenvolvimento da UEPS.

No capítulo 4, são apresentados os aspectos metodológicos da pesquisa, bem como a UEPS desenvolvida e implementada.

No capítulo 5, apresentamos os resultados da implementação da UEPS, com foco na análise de três momentos distintos da sequência didática: o passo 2 (questionário de

conhecimentos prévios), o passo 5 (análise da complexidade cognitiva das atividades) e o passo 7 (avaliação somativa). Esses momentos foram selecionados por representarem etapas-chave na investigação do processo de aprendizagem dos estudantes ao longo da intervenção.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as considerações finais da pesquisa, nas quais discutimos o possível domínio do campo conceitual dos estudantes ao longo da sequência didática, evidenciada a partir da análise das atividades selecionadas. Refletimos sobre os avanços observados nas construções cognitivas dos estudantes, bem como sobre os limites e potencialidades da proposta metodológica adotada. Além disso, destacamos a relevância do estudo para o campo da pesquisa em ensino de Ciências, especialmente no que diz respeito à abordagem de temas de Física Moderna.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Para assegurar a transparência, reprodutibilidade e rigor metodológico do processo, foram adotadas as diretrizes PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), conforme estabelecido por Moher et al. (2009).

Essas diretrizes oferecem recomendações padronizadas para a elaboração, análise e apresentação de revisões sistemáticas e meta-análises, contribuindo para a confiabilidade dos resultados obtidos. De acordo com os critérios PRISMA (2020), o primeiro passo na condução de uma RSL consiste na definição clara do problema de pesquisa e dos objetivos do estudo, os quais orientam todas as etapas subsequentes da busca e seleção dos estudos.

A pesquisa é realizada em diferentes bases de dados, com uma estratégia previamente delineada, utilizando descritores específicos que possibilitam localizar estudos pertinentes ao tema investigado. Essa abordagem visa minimizar vieses e ampliar a abrangência da literatura analisada (Moher et al., 2009). A seleção dos estudos ocorre em duas etapas: inicialmente, realiza-se a triagem dos títulos e resumos; em seguida, procede-se à leitura integral dos textos selecionados, garantindo que apenas os trabalhos mais relevantes sejam incluídos na análise final (PRISMA, 2020).

Dada a relevância das metodologias utilizadas no ensino de Radioatividade, compreende-se que a identificação e análise dessas abordagens contribuem de forma significativa para a elaboração de práticas pedagógicas mais contextualizadas. (Barcellos & Moreira, 2020). Nesse cenário, o presente estudo tem como objetivo responder à seguinte questão: *Quais as propostas metodológicas estão sendo abordadas no ensino de Radioatividade na Educação Básica?*

2.1 SELEÇÃO DOS TRABALHOS

Como fonte de informações para busca dos trabalhos, foram selecionadas bases de dados reconhecidas por sua relevância acadêmica: Periódicos CAPES, Scielo, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) e Catálogo de Teses e Dissertações (CAPES). A seleção abrangeu publicações realizadas entre os anos de 2013 a 2023, com o objetivo de mapear as produções mais recentes sobre o tema.

Para seleção dos trabalhos, foi feita previamente uma pesquisa exploratória para verificar quais palavras-chave os trabalhos referentes ao nosso objeto de estudo estão sendo utilizado com maior recorrência. Com base nessa análise, foram escolhidos os seguintes descritores: *Radiação*, *Radioatividade*, *Radiação Ionizante*, *Ensino de Física* e *Sequência Didática*.

Considerando o foco da pesquisa, a abordagem da radioatividade no contexto do Ensino de Física, utilizamos os operadores booleanos “AND” e “OR” para combinar os descritores de forma a refinar os resultados e garantir a pertinência dos estudos selecionados. As combinações de termos que geraram os resultados mais alinhados ao objetivo da revisão estão apresentadas no Quadro 1, organizadas conforme a base de dados em que foram aplicadas.

Quadro 1 – Quantitativo de trabalhos encontrados em cada base de dados de acordo com o booleano utilizado

Base de dados	Descritores	Quantitativo de trabalhos
Periódico CAPES	radiação OR (radioatividade OR radiação ionizante) AND (sequência didática OR ensino de Física)	89
BDTD	radiação OR (radioatividade OR radiação ionizante) AND (sequência didática OR ensino de Física)	32
SCIELO	radiação OR radioatividade OR radiação ionizante	5
Catálogo CAPES	radioatividade OR radiação ionizante	17

Fonte: Autor.

Com base nos resultados apresentados no Quadro 1, observamos a necessidade de aplicar um processo de refinamento dos dados, devido à quantidade de estudos inicialmente recuperados.

Segundo Prigol e Behrens (2019), esse tipo de pesquisa demanda um tratamento sistemático das informações, exigindo uma filtragem cuidadosa ao longo de diferentes etapas. Esse procedimento está em consonância com a segunda etapa do protocolo PRISMA (2020), que prevê uma seleção progressiva e criteriosa dos estudos, de modo a assegurar a relevância e a adequação dos trabalhos aos objetivos definidos pela pesquisa.

Dessa forma, para o processo de seleção dos trabalhos desta pesquisa, foram utilizados os seguintes passos para o refinamento dos dados.

1. Leitura dos títulos e resumos dos estudos encontrados;
2. Aplicação dos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos;

3. Leitura detalhada dos textos completos, com foco na correspondência com a questão de pesquisa;
4. Definição do corpus final para análise.

Os critérios utilizados na segunda etapa estão descritos no Quadro 2, os quais orientaram a triagem dos estudos de forma a manter apenas aqueles que atendiam aos recortes temático, metodológico e temporal estabelecidos nesta revisão.

Quadro 2 – Critérios de inclusão e exclusão dos trabalhos

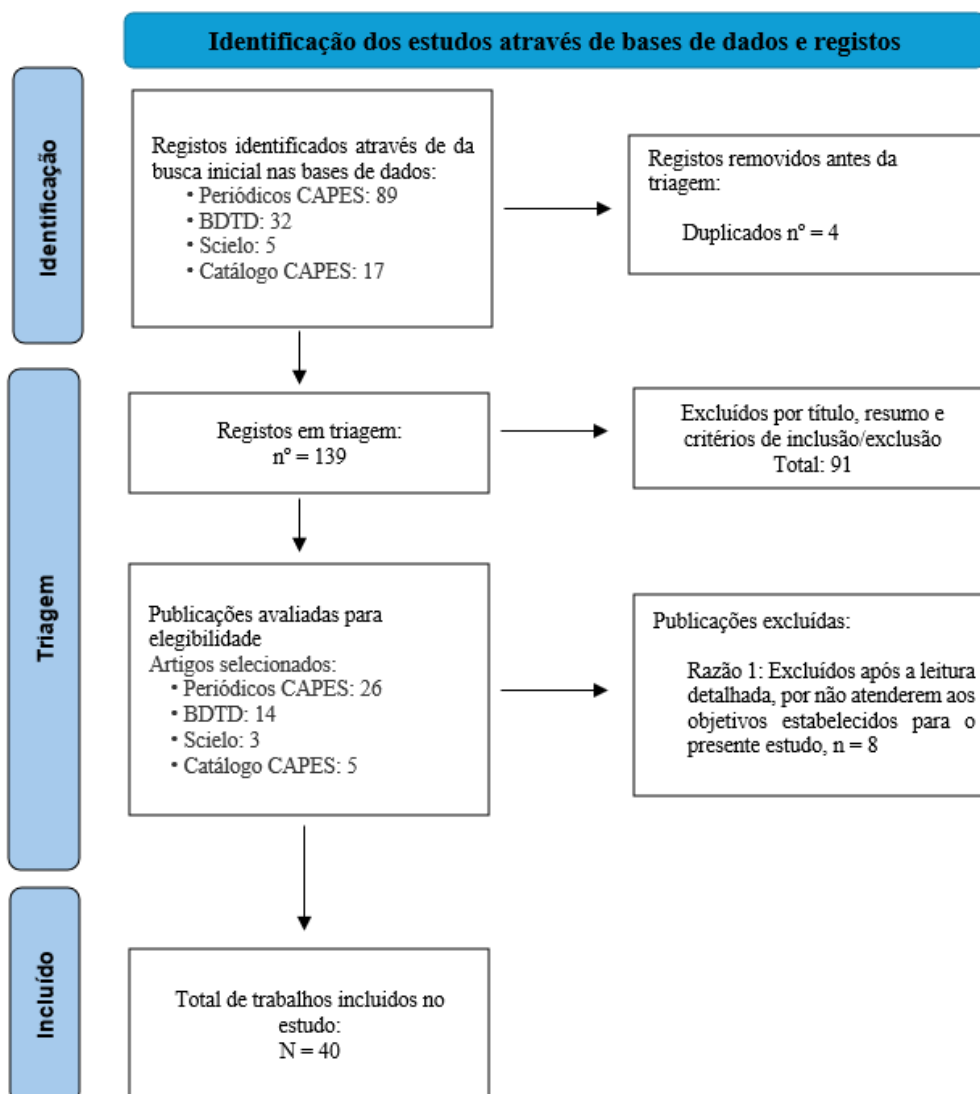
Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Trabalhos publicados no período de 2013 a 2023	A pesquisa não está situada e não possui foco no âmbito do Ensino de Física, sendo direcionada a outras áreas
A pesquisa aborda o Ensino da Radioatividade no contexto da Educação Básica	Pesquisas relacionadas a formação de professores
Trabalhos de revisão de literatura ou sistemática	
Teses e dissertações de programas de pós-graduação acadêmico ou profissional.	

Fonte: Autor.

Na Figura 1 apresentamos o fluxograma dos resultados obtidos, mostrando a quantidade de estudos localizados por meio dos descritores escolhidos e o refinamento progressivo dos dados em cada etapa da seleção.

A busca inicial, realizada nas bases de dados especificadas e utilizando descritores combinados por operadores booleanos, resultou em 143 trabalhos. Na etapa preliminar de análise de títulos e resumos, foram excluídos 91 estudos, restando 48 para avaliação mais aprofundada. Nesta fase, eliminaram-se trabalhos que não estavam alinhados com o objetivo central da pesquisa ou que se apresentavam como duplicatas entre as bases consultadas. Como resultado, formou-se o corpus final de 40 trabalhos para análise detalhada.

Figura 1 – Fluxograma conforme o protocolo PRISMA 2020



Fonte: Autor de acordo com Page et al. (2021).

2.2 ANÁLISE DOS TRABALHOS

Após a seleção dos trabalhos, foi realizada a leitura integral dos trabalhos, a partir da qual procedeu-se à análise e categorização. Inicialmente, foram utilizadas categorias a priori, adaptadas do trabalho de Ostermann e Moreira (2000), porém ajustadas ao contexto específico do ensino de Radioatividade, quais sejam: *Questões Epistemológicas e Históricas relacionadas à Radioatividade*; *Conhecimentos Prévios*

sobre Tópicos de Radioatividade; Temas de Radioatividade apresentados para Divulgação ou como Referência para Professores; Livros didáticos de Nível Médio que abordam temas de Radioatividade; Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem. No entanto, nem todas as categorias propostas foram consideradas para análise, pois nem todas continham trabalhos alinhados ou condizentes com a questão norteadora da nossa pesquisa.

Dentre os trabalhos encontrados, há também aqueles que podem se encaixar em diferentes categorias. Portanto, optamos por posicioná-los naquela que melhor corresponde ao seu objetivo, ressaltando que a classificação adotada neste contexto é apenas uma entre várias possibilidades. No quadro 3 apresentamos os 40 estudos selecionados, destacando o tipo de trabalho, título e autores.

Quadro 3 – Relação dos trabalhos analisados de acordo com sua classificação

Título	Autor (es)	Tipo de estudo
Uma história da radioatividade para a Escola Básica: desafios e propostas	Gomes, (2019)	Questões Epistemológicas e Históricas relacionadas à Radioatividade
Uma abordagem para o ensino de modelos atômicos e radioatividade a partir da história da ciência	Silva, (2019e)	Questões epistemológicas e históricas relacionadas à radioatividade
O filme “Radioactive” e a história das mulheres na ciência: uma proposta de sequência didática	Thomé & Mendes (2023)	Questões Epistemológicas e Históricas relacionadas à Radioatividade
Radioatividade e história das ciências como percursos transdisciplinares: desafios e possibilidades	Da Silva, (2020)	Questões epistemológicas e históricas relacionadas à radioatividade
Utilização do programa MAXqda10 na investigação de subsunçores de estudantes de nível médio a respeito do tema radioatividade e de sua relação com a ciência, tecnologia e sociedade (CTS)	Antiszko & Sauer, (2018)	Concepções Alternativas sobre Tópicos de Radioatividade
As radiações na medicina: o que dizem livros didáticos de física do ensino médio?	Silva, (2019d)	Livros didáticos de Nível Médio que abordam temas de Radioatividade
O ensino da radioatividade nos livros de física do pnld e o enfoque cts	Cortez & Oliveira, (2020)	Livros didáticos de Nível Médio que abordam temas de Radioatividade
A transposição didática do fenômeno da radioatividade em manuais escolares de física	Silva Junior & Londero, (2019)	Livros didáticos de Nível Médio que abordam temas de Radioatividade
Raios-x e radioterapia: uma oficina temática para abordar conceitos de radiações e radioatividade no ensino médio na perspectiva da contextualização	Gonzatto, (2020)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Ensino de Física: Radiações Ionizantes e suas aplicações no contexto do ensino de Ondas	Ferreira, (2021)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem

Ensino de Física usando situações-problema sobre o uso de radiações ionizantes para o diagnóstico do câncer de mama	Oliveira & Campos, (2022)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Uma sequência didática para o ensino da radioatividade no nível médio, com enfoque na história e filosofia da ciência e no movimento CTS	Resquetti, (2013)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Abordagem CTS da energia nuclear na Educação de Jovens e Adultos	Silva et al., (2017c)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Ensino de Física nuclear com enfoque cts por meio da experimentação	Boch, (2018)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Energia nuclear radioativa: uma análise dos obstáculos epistemológicos	Fagundes, (2019)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Ensino de Física das radiações ionizantes: do senso comum Ao conhecimento científico.	Pinheiro, (2016)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
O legado de Madame Curie Uma abordagem CTS para o Ensino da Radioatividade	Cortez, (2014)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Uma sequência didática para introdução à física das radiações ionizantes no ensino médio	Uliano, (2018)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Desenvolvimento de recursos de estratégias para o ensino-aprendizagem de radioatividade	Oliveira, (2016)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Sequência de ensino e aprendizagem sobre radioatividade pautada na perspectiva Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS)	Monteiro & Silva, (2020)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Produto educacional para o ensino de radioatividade por meio de uma sequência didática em uma abordagem ciência, tecnologia e sociedade (CTS)	Antiszko et al., (2016)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Radioatividade: um módulo didático para o ensino médio	Dias, (2013)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Estudo de radiações ionizantes e não ionizantes utilizando como facilitador a câmara de nuvens caseira	Moraes, (2020)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Radiações ionizantes e radiações não ionizantes no ensino médio	Fiuza, (2016)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Compreensões de estudantes de nível médio sobre descoberta: discussões em torno do episódio da descoberta da radioatividade em uma sequência de ensino e aprendizagem	Rocha & Silva, (2019)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Espectro eletromagnético: um material didático para o ensino das radiações ionizantes e não ionizantes para prática inclusiva de estudantes com deficiência visual	Da Silva, (2023)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Ensino de radiação ionizante utilizando materiais de baixo custo: Contador Geiger, weblab-Geiger e simuladores	Da Silva, (2019)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Wilson chamber – na experimete proposal using low cost material for teaching radioactivity	Pessanha & Razuck, (2020)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem

Estudo do decaimento com o uso da Plataforma Phet: uma proposta para EAD	Machado & Cruz, (2020)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Proposta de um experimento para a compressão da meia-vida radioativa com o uso de poliedros físicos e virtuais	Berti, et al., (2023)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Uma experiência didática com unidades de ensino potencialmente significativas para o tópico radiações ionizantes	Bortoli, et al., (2019)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
A inserção da Física Moderna e Contemporânea em ambientes reais de sala de aula: uma sequência de ensino aprendizagem sobre radioatividade.	Batista & Siqueira, (2017)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Júri simulado: o uso da argumentação na discussão de questões sociocientíficas envolvendo radioatividade	Stumpf & Oliveira, (2016)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Heróis em quadrinhos: Radioatividade a partir de uma perspectiva interdisciplinar em subprojeto PIBID	Ramires, (2022)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Uma nova estratégia para o ensino de Física nuclear e radioatividade para o novo ensino médio: auto aprendizagem guiada por aplicativo web	Fernandez, et al., (2021)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Sequência didática baseada no arco de Magueres a partir do diagnóstico sobre o tema radioatividade	Oliveira, et al., (2020)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Práticas Experimentais no ensino de física nuclear utilizando material de baixo custo	Boff, et al., (2017)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Desenvolvimento de uma máquina de raios X, um detector Geiger e um goniômetro de baixo custo para estudo sobre raios X	Silva & Fonseca, (2023)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Radioactivity 1.0: um produto educacional para o uso em aulas de física	Schneider, et al., (2023)	Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem
Radiações e suas relações com a medicina: uma revisão na área de ensino de física	Silva, (2017b)	Revisões bibliográficas com o tema radioatividade

Fonte: Autor.

2.2.1 Análise por Categorias

Na categoria *Questões Epistemológicas e Históricas* relacionadas à Radioatividade, foram agrupados os estudos que se dedicaram à discussão das rupturas de paradigmas, à contextualização teórica, à história e filosofia dos temas ligados à radioatividade, assim como às descobertas científicas recentes. Na categoria, *Conhecimentos prévios sobre Tópicos de Radioatividade*, foram incluídos os trabalhos que investigaram diferentes concepções iniciais existentes. Na categoria de *Temas de Radioatividade apresentados para Divulgação ou como Referência para Professores*, foram categorizados os estudos que apresentaram estudos teóricos e de divulgação sobre o tema, além de fornecerem explicações mais detalhadas sobre os métodos matemáticos para descrever os fenômenos relacionados. Os *Livros Didáticos de Nível Médio que abordam temas de Radioatividade* constituem a próxima categoria, englobando análises dos conteúdos presentes nesses materiais. Em relação às *Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem*, embora Ostermann e Moreira (2000) tenham delimitado essa categoria a trabalhos com resultados de aprendizagem, também foram incluídos estudos que apresentaram apenas propostas didáticas. Por último, foi criada uma categoria adicional, *Revisões bibliográficas com o tema radioatividade*, para trabalhos no qual o foco foi fazer uma revisão bibliográfica relacionados à Radioatividade.

2.2.1.1 Questões Epistemológicas e Históricas relacionadas à Radioatividade

Nesta categoria, apresentamos quatro trabalhos que exploram a história, a filosofia e as questões epistemológicas relacionadas à radioatividade. Esses trabalhos discutem o desenvolvimento histórico da compreensão da radioatividade, as implicações filosóficas das descobertas científicas nesse campo, e os desafios epistemológicos que surgem ao tentar entender e ensinar esse fenômeno e apresentam propostas de inserção destas questões.

Gomes (2019) defende os benefícios do uso da História da Ciência na educação científica. Seu trabalho concentra-se na elaboração de uma abordagem didática para o ensino da história da radioatividade no Ensino Médio, destinada a professores de Química e Física. Ele também abrange diversos aspectos da pesquisa sobre a radioatividade, desde seus primórdios nas décadas de 1890 e 1900 até suas aplicações

ao longo do século XX. A construção de sua proposta didático-metodológica é fundamentada em uma abordagem metodológica que lida especificamente com os obstáculos identificados na literatura. Essa proposta apoiou-se na seleção e adaptação de conteúdos históricos, buscando superar desafios pedagógicos, e propõe atividades didáticas contextualizadas de acordo com as características de cada ambiente educacional e os objetivos epistemológicos estabelecidos pelo autor.

Por outro lado, Silva (2019e), trouxe os temas de Modelos Atômicos e Radioatividade, defendendo que são abordados de forma conectada através da História da Ciência. A autora sustenta que a História da Ciência desempenha um papel fundamental nesta abordagem, ao contextualizar e estabelecer conexões entre os temas, especialmente considerando a influência da história da radioatividade na compreensão do átomo. A sequência de ensino adotada envolve a apresentação de aulas diversificadas, iniciando cada sessão com uma explanação do contexto histórico relacionado à época em que o modelo em estudo foi proposto. Ao término, observou-se que a inclusão da História da Ciência na proposta educacional revelou-se bem-sucedida, resultando em maior engajamento e participação dos estudantes, refletindo positivamente no desempenho deles na assimilação desse conteúdo.

Enquanto que Mendes e Thomé (2023), trouxeram a história da ciência como um meio de destacar e reconhecer a contribuição e o papel expressivo da mulher na ciência. A sequência didática utilizou o filme “Radioactive”. O estudo teve como ponto de partida a análise do filme, visando explorar as potencialidades didáticas presentes em uma sequência de atividades estruturada a partir da identificação dos conhecimentos prévios dos estudantes. Essa abordagem seguiu com a problematização da temática e a utilização de trechos específicos do filme para introduzir o ensino da radioatividade, provocando a discussão sobre desafios no acesso à carreira científica, a discriminação enfrentada e a persistente negligência em relação à contribuição feminina na ciência. A sequência resultou em uma avaliação construída coletivamente pelos estudantes. Como desdobramento, a proposta didática enfatiza intervenções que visam romper com práticas de ensino de ciências que negligenciam a relevância da produção científica feminina e perpetuam a desigualdade de gênero ao longo da história científica.

Para Da Silva (2020), o percurso desenvolvido em perspectiva transdisciplinar a partir do estudo da radioatividade estimula a investigação. O trabalho realizado envolveu a criação de estações que exploraram, de maneira contextualizada, diversas áreas do conhecimento, tendo como ponto de partida e maior foco o estudo da

radioatividade. Foi empregada a técnica conhecida como "tempestade de ideias", onde artigo enfocou a investigação da História das Ciências, reconhecendo a relevância dos contextos históricos nos quais os conceitos são desenvolvidos para a compreensão desses conceitos e, principalmente, para a reflexão sobre a natureza científica.

Dessa forma, a História da Ciência e as questões epistemológicas associadas são de grande relevância, especialmente no início do ensino de conceitos relacionados a temas como a radioatividade. Esses elementos oferecem um contexto significativo, permitindo uma abordagem mais engajadora e reflexiva para os estudantes, como destacado pelos autores mencionados. Contudo, optamos por não utilizar essa abordagem como foco principal na sequência didática desenvolvida, direcionando-a mais para os conceitos propriamente ditos. Essa decisão foi tomada para evitar a mistura de várias abordagens, já que, por exemplo, seria possível estruturar uma sequência didática inteiramente voltada para a História da Ciência, visto que essa abordagem também não se alinhava ao objetivo central da minha proposta, que priorizou um desenvolvimento mais direto e aplicado dos conceitos científicos no contexto planejado.

2.2.1.2 Conhecimentos Prévios sobre Tópicos de Radioatividade

Nesta categoria apresentamos apenas o trabalho de Antiszko e Sauer (2018), os autores trouxeram um trabalho voltado à investigação dos subsunçores através do software *MAXqda10* e também através da abordagem CTS. Os autores concluíram que esse tipo de atividade ajuda na identificação dos conhecimentos que estudantes têm sobre radioatividade, e auxilia no planejamento de futuras abordagens.

Investigar as concepções prévias dos estudantes é, sem dúvida, uma etapa fundamental no processo de ensino-aprendizagem, pois permite compreender o nível de conhecimento dos estudantes, identificar áreas de maior domínio ou fragilidade e ajustar o planejamento pedagógico conforme as necessidades específicas da turma. A partir dessas informações, é possível decidir se o conteúdo pode ser abordado de forma mais avançada ou se é necessário iniciar pelos fundamentos básicos, garantindo assim uma base para o aprendizado. Reconhecendo essa importância, nosso trabalho também incluirá uma etapa dedicada à investigação dos conhecimentos prévios, alinhando-se ao referencial de UEPS, que enfatiza essa prática como parte essencial do processo educativo. A abordagem de Antiszko e Sauer (2018), por exemplo, ilustra o valor dessa estratégia ao explorar os subsunçores dos estudantes por meio do software *MAXqda10*

e da abordagem CTS, destacando como essa etapa contribui para planejar intervenções pedagógicas mais eficazes, especialmente em temas como a radioatividade. Dessa forma, reafirmamos a relevância de compreender as ideias prévias dos estudantes como um alicerce para a construção de um ensino significativo e contextualizado

2.2.1.3 Livros didáticos de Nível Médio que abordam temas de Radioatividade

Nesta categoria, apresentamos três trabalhos que investigam a forma como os livros didáticos abordam o tema da radioatividade. Esses estudos analisaram as informações fornecidas, bem como a relevância dos exemplos, metodologias e as atividades propostas.

Silva (2019d) analisa como o ensino da Física das Radiações está sendo empregado na medicina, porém tomando os livros didáticos como alvos de estudo. O trabalho analisou nove coleções aprovadas pelo PNLD-2018 e concluiu que os livros destinam poucas sessões para o tema comparado a outros assuntos, e os temas mais abordados sobre medicina foram radiografia e medicina nuclear. De forma geral, o autor destaca percepções distorcidas sobre o tema quando aplicado à saúde, além de visões pouco críticas sobre a relação entre a física das radiações e a medicina.

A pesquisa de Cortez e Oliveira (2020), apresentam uma análise dos livros didáticos do PNLD-2018 com o tema de radioatividade e o enfoque na Ciência – Tecnologia – Sociedade (CTS). O trabalho tem como objetivo fornecer subsídios aos professores para que façam uma escolha adequado do livro ao abordar o tema. Os autores concluem que a maioria dos livros valoriza o contexto histórico, a problematização e a integração de questões socioambientais no ensino da radioatividade. Por outro lado, Silva Junior e Londero (2022) abordam como os livros do PNLD 2018 – 2020, apresentam visões deformadas sobre o conteúdo de radioatividade. O principal objetivo dos autores é discutir a transposição didática, além dos processos de descontextualização e despersonalização dos saberes, observando que os manuais analisados frequentemente optam por uma abordagem focada apenas na aplicação de tecnologias.

De forma geral, os livros didáticos dedicam pouco espaço ao estudo da Física Moderna, frequentemente limitando-se a uma ou duas seções para abordar um tema tão vasto e relevante (Alberti, 2016; Silva, 2019d; Cortez e Oliveira, 2020). Dois dos três trabalhos analisados apontam a presença de visões deformadas que os livros trazem

sobre o assunto, o que evidencia como a Física Moderna pode ser um tema complexo e de difícil abordagem no contexto educacional. Essa situação reflete os desafios enfrentados para tratar de maneira adequada temas que exigem contextualização histórica, conexões com aplicações práticas e discussões críticas, muitas vezes ausentes ou subvalorizadas nas obras analisadas. Isso reforça a necessidade de um esforço contínuo para que os materiais didáticos ofereçam um ensino mais completo e alinhado às demandas de uma educação científica integrada e reflexiva.

2.2.1.4 Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem

Nesta categoria, apresentamos trinta e um trabalhos que propõem métodos de ensino e sequências didáticas para abordar o tema da radioatividade em sala de aula. Os trabalhos oferecem estratégias e práticas para tornar o ensino da radioatividade mais acessível e envolvente para os estudantes. As propostas incluem atividades experimentais, uso de tecnologias educativas, integração de contextos históricos e sociais, e abordagens interdisciplinares. O objetivo é fornecer aos educadores ferramentas e recursos que possam facilitar a compreensão dos conceitos de radioatividade, corrigir concepções alternativas e estimular o interesse dos estudantes por esse tema complexo e relevante.

Gonzatto (2020), apresenta uma abordagem contextualizada do conteúdo de Radiação e Radioatividade por meio da proposição metodológica de uma Oficina Temática aplicada à medicina. A Oficina Temática, foi estruturada com base nos três momentos pedagógicos, onde destaca a temática Radiação e Radioatividade como possuindo forte caráter interdisciplinar, uma vez que sua exploração envolve conceitos provenientes de diversas disciplinas. O autor destaca, ao final, os avanços significativos observados no entendimento dos estudantes acerca do uso da radiação na medicina. Além disso, a pesquisa evidencia a percepção dos estudantes quanto à importância da disciplina de Química em seus currículos escolares, com a maioria deles afirmando aplicar os conhecimentos químicos em seu dia a dia.

O trabalho de Ferreira (2021) consistiu na elaboração de uma sequência didática que integrasse o conteúdo das radiações ionizantes ao estudo das ondas, visando explorar alguns conceitos da Física Moderna. O enfoque direciona-se para a discussão sobre exames radiológicos, como raios X, mamografias e tomografias computadorizadas, a fim de proporcionar aos estudantes uma compreensão mais

aprofundada sobre as práticas de diagnóstico médico em seu cotidiano. Um dos objetivos estabelecidos buscou sensibilizar os estudantes acerca da importância dos exames preventivos, notadamente no caso do câncer de mama, culminando em uma participação ativa da comunidade escolar na campanha nacional de prevenção ao câncer de mama denominada "outubro Rosa". Este recurso educacional buscou, ainda, a contextualização mais efetiva dos conteúdos de Física, o engajamento da comunidade escolar em ações benéficas vinculadas ao dia a dia, e a promoção da interdisciplinaridade ao integrar conhecimentos de biologia e química em um projeto conjunto.

Com o mesmo foco, Oliveira e Campos (2022) abordaram o ensino de Física no Ensino Médio utilizando situações-problema sobre radiações ionizantes, com ênfase no uso do raio-X para o diagnóstico do câncer de mama. A sequência didática consistiu em discussões sobre o tema, apresentação de vídeos, gifs e resoluções de questões para subsidiar a solução das situações problemas.

Resquetti (2013) desenvolveu uma abordagem metodológica destinada ao ensino da radioatividade no Nível Médio, com enfoque nas relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e na História e Filosofia da Ciência. Para elaborar essa proposta, investigou-se a maneira como o tema da radioatividade é abordado nos livros didáticos de Física do PNLD/2012, e a partir dessa análise, foi construída uma sequência didática para o ensino desse conceito no Ensino Médio.

O estudo de Cortez (2014) apresenta uma abordagem do ensino da Radioatividade baseada na abordagem Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Utilizando a vida e o legado de Marie Curie como elemento central, foi adotada uma introdução multidisciplinar ao conteúdo de Radioatividade, abrangendo Biologia, História, Química, Filosofia, Sociologia, Matemática, Medicina, além de Física. A principal meta foi abordar de maneira abrangente e significativa o tema da Radioatividade, considerando que esse assunto normalmente é tratado na disciplina de Química ou é uma das opções na disciplina de Física para a introdução de conteúdos de Física Moderna no terceiro ano.

Oliveira (2016) traz a experiência de uma sequência didática voltada para o ensino de Radioatividade destinada a uma turma de terceira série do Ensino Médio. O autor adotou a abordagem CTS, aliada ao referencial de Paulo Freire, visando mostrar aos estudantes habilidades e competências necessárias para a tomada de decisões e o desenvolvimento de uma perspectiva crítica em relação ao mundo. Para a coleta de

dados, foram elaborados questionários mistos contendo perguntas abertas e fechadas, aplicados como pré e pós-testes. A avaliação do aprendizado foi conduzida por meio de uma prova discursiva abrangendo aspectos históricos, teóricos e sociais. Além disso, um teatro em formato de júri simulado foi empregado para criar um espaço de debate e discussão sobre o tema. Essa abordagem demonstrou uma transformação no pensamento dos estudantes, despertando o interesse por novos conhecimentos e capacitando-os a adotar uma postura mais crítica ao enfrentar problemas, avaliando seus riscos e benefícios de maneira mais informada.

Nesta perspectiva, o trabalho de Silva et al. (2017), teve como propósito elaborar uma unidade de ensino com o tema Energia Nuclear, também utilizando a abordagem CTS, na qual problemáticas sociais relacionadas foram apresentadas e debatidas. Ao longo da unidade, os autores observaram mudanças nos discursos dos estudantes, evidenciadas por argumentações mais elaboradas e fundamentadas ao expressarem defesa ou crítica à energia nuclear. Além disso, houve uma clara exposição de opiniões, tanto técnicas quanto pessoais, relacionadas à questão, indicando uma melhoria na compreensão do tema de radioatividade.

Da mesma forma, Boch (2018) realizou um estudo centrado na energia nuclear, com uma abordagem metodológica baseada em CTS, que demonstrou ser eficaz efetivo no ensino de Física Nuclear. Para tal, uma sequência de aulas de experimentos, sobre o tema Radioatividade e suas Tecnologias, foi desenvolvida e ministrada para uma turma da Educação de Jovens e Adultos (EJA). O eletroscópio, um dos principais experimentos do tema e instrumento historicamente relevante para a pesquisa em radioatividade por cientistas como Marie Curie, Rutherford e Geiger, foi empregado. Essa experiência proporcionou uma base sólida para explorar conceitos científicos fundamentais, a História da Ciência e os métodos de pesquisa da época. Além disso, estimulou uma análise crítica em relação à comercialização de objetos radioativos. Ao final, os estudantes compartilharam reflexões significativas sobre o papel da radioatividade no desenvolvimento tecnológico, seu impacto na melhoria da qualidade de vida contemporânea e as implicações sociais decorrentes de seu uso inadequado.

Uliano (2018) e Monteiro e Silva (2020) argumentam que o ensino de Física deve capacitar os estudantes a interpretar o mundo sob a ótica das Ciências, utilizando conceitos, leis e teorias científicas, ao mesmo tempo em que reconhecem elementos presentes em seu cotidiano, especialmente os de natureza social e cultural. Com essa perspectiva, os autores elaboraram uma Sequência Didática voltada para o

ensino da Física das radiações no ensino médio, considerando as interações entre CTS relacionadas a esse conteúdo. As sequências envolveram atividades abrangendo a introdução à física das radiações, raios X, rejeitos radioativos e a aplicação da radiação em diversas áreas. Para concluir, Uliano (2018) propõe aos estudantes participarem de uma visita técnica, proporcionando-lhes a oportunidade de correlacionar e vivenciar na prática os temas teóricos abordados em sala de aula.

Já Antiszko et al. (2016) apresentam um produto educacional sob a perspectiva CTS, composto por uma série de atividades destinadas a abordar o tema da radioatividade. Essas atividades englobam aspectos históricos da radioatividade, questionários, vídeos sobre acidentes radiológicos e aplicações práticas no cotidiano, entre outras abordagens. Por meio dessa sequência didática, os autores estabeleceram uma conexão entre o conteúdo científico e a realidade dos estudantes, destacando as interações da radioatividade com a ciência, a tecnologia e a sociedade.

Fagundes (2019) expressa críticas em relação ao ensino baseado na memorização de nomes e fórmulas, propondo, em contrapartida, a adoção de recursos audiovisuais, incluindo filmes e histórias em quadrinhos (HQ), como alternativas viáveis para abordar os conteúdos químicos de maneira mais envolvente e contextualizada. O foco do estudo concentrou-se na validação de uma sequência didática voltada para o ensino da energia nuclear, seguindo os três momentos pedagógicos. Os resultados revelam as reflexões do educador sobre o potencial das HQ e dos filmes como ferramentas de contextualização para aprimorar o processo de ensino.

Pinheiro (2016) impulsionado pelo considerável número de estudantes que desconhecem o tema da radioatividade, incluindo seus benefícios e a distinção entre radiação ionizante e não-ionizante, onde a percepção dos estudantes muitas vezes é aquela gerada pela mídia, destacando a radiação como prejudicial. O trabalho veio com objetivo abordar o tema em sala de aula por meio de uma sequência didática destinada a estudantes do ensino profissionalizante, sob a perspectiva da teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel. O trabalho iniciou com uma breve explanação sobre a aprendizagem significativa e seus principais contribuintes, seguido pela abordagem do ensino da física das radiações, especificamente à radiação ionizante. Em seguida, estabelece-se a relação entre a física das radiações e a aprendizagem significativa de Ausubel. Por fim, apresenta-se a sequência didática elaborada para os estudantes.

Dias (2013) apresenta um módulo didático abordando conceitos relevantes sobre o tema da Radioatividade. Esse módulo foi elaborado por meio do *software* livre *eXe*

Learning e está disponível gratuitamente na internet. O conteúdo do módulo compreende cinco aulas, alinhadas aos três momentos pedagógicos propostos por Delizoicov e Angotti.

O estudo de Moraes (2020) aponta que o material oferecido nas escolas faz uma abordagem superficial de conceitos importantes, tais como radiações ionizantes e não ionizantes. Além disso, a complexidade desses conceitos pode dificultar a compreensão, levando os professores a priorizarem frequentemente os conteúdos da Física Clássica. Diante desse cenário, o autor propõe a criação e implementação de uma câmara de nuvens caseira por meio de uma sequência didática. Essa abordagem visa simplificar a compreensão dos conceitos de radiações ionizantes e não ionizantes, transformando conceitos abstratos em algo tangível para os estudantes. Dessa forma, busca-se proporcionar uma associação mais direta com o cotidiano dos estudantes, permitindo-lhes compreender os malefícios e benefícios desses conceitos.

Os trabalhos, de Fiuza (2016) e Rocha e Silva (2019) trazem uma proposta alternativa para trabalhar radiações ionizantes e não ionizantes de uma maneira a relacionar fatos do cotidiano com os conteúdos trabalhados em sala de aula através de unidades temáticas, que será entregue em forma de texto. Nas sequências didáticas foram utilizadas apresentações de texto retiradas de revistas e internet sobre o tema na atualidade, tais como em um primeiro momento coisas que se assimilaram de forma negativa como: bomba atômica e desastres radioativos. Em um segundo momento, uma relação positiva como, na radiação na medicina, geração de energia, e datação. E dessas formas mostrar a importância de reformular os métodos tradicionais de ensino, e fazer com que os estudantes sejam mais críticos.

Da Silva (2019) e Razuck e Pessanha (2020) propõem projetos semelhantes, o ensino de radiações ionizantes, utilizando ferramentas de baixo custo para apoiar o processo de ensino-aprendizagem baseado em experimentação. Ao término, os autores realizam uma comparação entre as vantagens e desvantagens do uso dessas ferramentas, assim como avalia o desempenho de um grupo submetido a aulas tradicionais do conteúdo em comparação com outro grupo que participou apenas das aulas experimentais.

Da Silva (2023) critica os desafios enfrentados ao ensinar física a estudantes com deficiência visual no contexto escolar. Diante disso, o trabalho tem como objetivo desenvolver uma sequência didática e seus artefatos para o ensino de radiações ionizantes e não ionizantes a partir do espectro eletromagnético. A participação ativa

dos estudantes e a construção de conceitos com base nas conclusões alcançadas sugerem que a utilização de uma abordagem diferenciada, envolvendo maquetes tridimensionais, áudios e materiais acessíveis, associada à metodologia ativa com o uso do cartão codificado, traz benefícios para a prática educacional de forma mais inclusiva

Berti et al. (2023) e Machado e Cruz (2020), propõem uma abordagem para ilustrar a meia-vida radioativa no contexto do decaimento radioativo. Enquanto Berti et al. (2023) utiliza poliedros de forma lúdica e descontraída, Machado e Cruz (2020) utilizam a plataforma Phet demonstrar o decaimento. Em ambos, foram conduzidas simulações das curvas de decaimento radioativo, onde os estudantes relataram que, após a realização do experimento, conseguiram contextualizar o comportamento exponencial devido à simulação do decaimento radioativo. Esse contexto motivou-os a buscar mais informações sobre o fenômeno da radioatividade.

As propostas de Batista e Siqueira (2017) e Bortoli et al. (2019) para o ensino das radiações ionizantes, trazem questionamentos de: como, onde e por quê realmente inserir a FMC sem ocorrer de forma tradicional. O primeiro autor apresenta sua sequência didática por meio da abordagem da Pesquisa Baseada em Projetos, enquanto o segundo utiliza a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa. Ambos os autores tinham um objetivo secundário, ao final da sequência, O primeiro autor traz sua sequência didática através da abordagem da Pesquisa Baseada em Projetos, enquanto que o segundo através da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa. Os autores tinham, também, um objetivo secundário, ao fim da sequência, pode fazer uma visita técnica ao setor radiológico de um hospital.

Stumpf e Oliveira (2016), propõem a estratégia de ensino do júri simulado como meio de desenvolver atividades que promovam a argumentação e explorem questões inerentemente polêmicas e controversas relacionadas a temas cientificamente fundamentados, conhecidas como questões sociocientíficas. Neste contexto, a discussão foca na aplicação da radioatividade em diversos setores da sociedade, com ênfase especial na análise da utilização de usinas nucleares como fontes de energia. São abordando tanto os benefícios quanto os malefícios associados a esse fenômeno físico-nuclear para os seres humanos e o meio ambiente.

Ramires (2022) propõe uma atividade interdisciplinar através de histórias em quadrinhos (HQ) sobre a radioatividade, segundo a autora essa abordagem ajuda na discussão integrada dos conhecimentos físicos e químicos relativos ao tema da radioatividade.

Fernandez et al. (2021) demonstra uma estratégia para o ensino de Física nuclear e radioatividade para o novo ensino médio, defendendo que a mídia tende a afastar o jovem estudante do ensino médio dessa área da ciência devido a notícias que são veiculadas sobre o tema. Dessa maneira, ele procurou desenvolver uma atividade que se dá de uma forma crítica, relativamente aprofundada e não tendenciosa.

Oliveira et al. (2020) propõe uma sequência didática fundamentada nas etapas do arco de Magueres, utilizando o seriado Chernobyl como ponto de partida para a problematização. Ao final do processo, a proposta envolve a criação de um contador Geiger por meio de um Arduino. Schneider et al. (2023) desenvolveu uma sequência didática composta por quatro etapas, cada uma com propósitos específicos e interconectados, formando uma narrativa de uma aventura RPG que aborda conceitos relacionados à radioatividade e a energia nuclear. O autor evidencia que o uso do RPG se revelou como uma ferramenta promissora e versátil no contexto educacional, possibilitando diversas adaptações nas atividades.

Boff et al. (2017) expressam críticas em relação à escassa disseminação de experimentos relacionados à física moderna. O artigo propõe duas práticas experimentais destinadas ao estudo da física nuclear, utilizando uma câmara de ionização de baixo custo. O trabalho apresenta detalhadamente as práticas experimentais, seus resultados e sugestões para incorporação em aulas sobre física nuclear.

Já os autores, Schneider et al. (2023) desenvolveram uma sequência didática estruturada em quatro etapas com finalidades específicas, compondo uma aventura de RPG que explora temas relacionados à radioatividade e energia nuclear.

No estudo realizado por Silva e Fonseca (2023), descrevem o desenvolvimento de uma máquina de raios X de baixo custo com finalidade didática, além da obtenção e análise de radiografias de diversos objetos. Também é abordada a construção de um contador Geiger-Müller e um goniômetro, utilizados para estudos relacionados à difração e absorção. Apesar de não terem alcançado os resultados esperados para análises mais precisas nesses aspectos, os dispositivos construídos demonstraram-se altamente eficazes para fins didáticos envolvendo raios X.

Essas investigações demonstram uma diversidade de abordagens pedagógicas, que incluem desde a aplicação da perspectiva Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) até o uso de sequências didáticas interdisciplinares, recursos experimentais de baixo custo

e estratégias lúdicas como histórias em quadrinhos, jogos de RPG e simulações computacionais.

As metodologias adotadas buscaram não apenas a transmissão de conteúdos, mas também a contextualização dos conhecimentos, a promoção do pensamento crítico e o envolvimento dos estudantes em temas de relevância social e científica. Grande parte das propostas destacam a aplicação prática da radioatividade, especialmente no âmbito da medicina, com foco em procedimentos como radiografias e tomografias, e na discussão sobre a energia nuclear, considerando seus benefícios tecnológicos e os impactos ambientais associados.

Esses estudos revelam um esforço significativo para conectar os conceitos teóricos da Física com situações do cotidiano, ampliando a percepção dos estudantes sobre a importância da ciência em sua realidade e incentivando a construção de um aprendizado mais significativo e integrado. Assim, a implementação dessas propostas contribui para a formação de cidadãos mais críticos, conscientes e aptos a dialogar com questões científicas e sociais contemporâneas.

2.2.1.5 Revisões bibliográficas com o tema radioatividade

Nesta categoria apresentamos o trabalho de Silva (2017), que analisou 24 periódicos para investigar como os estudos com essa temática na área de física tem abordado essas relações com a medicina. Além disso, o autor apontou as contribuições dos trabalhos para o ensino, como: justificativas para o ensino das radiações e considerações sobre recursos didáticos utilizados nesse tipo de conteúdo. Ao fim, o autor defende o ensino de Física e a relação à radioatividade com os aspectos ligados à medicina.

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO

De forma geral, os trabalhos analisados apresentaram uma ampla variedade de abordagens e subtemas relacionados à radioatividade, tais como: Ciência, CTS, experimentação, história e filosofia da ciência, física médica, física nuclear, entre outros. Essa diversidade de enfoques evidencia a complexidade e a amplitude das propostas pedagógicas vinculadas ao tema, sugerindo a existência de distintas perspectivas sobre como integrar e apresentar os conceitos de radioatividade no contexto educacional. Embora essa variedade represente um desafio, ela também ressalta a

importância de uma reflexão contínua e de um diálogo constante entre educadores e pesquisadores.

Outro aspecto relevante é que a maioria dos trabalhos analisados se enquadra na categoria Propostas Testadas em Sala de Aula com Resultados de Aprendizagem. Esse dado revela uma forte ênfase na aplicação prática do ensino da radioatividade, o que demonstra um interesse expressivo em desenvolver e implementar estratégias pedagógicas que promovam uma compreensão mais significativa e contextualizada dos conceitos envolvidos.

No âmbito dessa mesma categoria, foi possível identificar três enfoques predominantes para o ensino da radioatividade: o movimento CTS, o uso de simuladores, e a abordagem baseada na história e filosofia da ciência. No entanto, destacamos que apenas um dos trabalhos analisados, Bertti et al. (2023), utilizou a metodologia UEPS (Unidades de Ensino Potencialmente Significativas) em sua sequência didática. Isso indica que, apesar do potencial dessa metodologia para favorecer uma aprendizagem contextualizada e significativa, ela ainda é pouco explorada no ensino de radioatividade.

3. APORTE TEÓRICO

Neste capítulo, abordamos alguns aspectos das teorias de aprendizagem que serviram como base para a construção e implementação da UEPS. Inicialmente, exploramos alguns dos fundamentos da Teoria da Aprendizagem Significativa - TAS de David Ausubel, que enfatiza a importância da estrutura cognitiva prévia do estudante para a assimilação de novos conhecimentos. Incorporamos também a metodologia das UEPS de Marco Antônio Moreira, que propõe a organização do ensino em unidades que favoreçam a aprendizagem significativa através da contextualização e integração dos conteúdos. Moreira (2011), enfatiza a importância de criar situações de ensino que sejam potencialmente significativas para os estudantes, facilitando a ancoragem de novos conhecimentos em estruturas cognitivas já existentes.

Por fim, a Teoria dos Campos Conceituais – TCC de Gérard Vergnaud como referencial teórico de análise. Esta teoria sugere que a compreensão de conceitos científicos se dá através de um conjunto de situações-problema que são inter-relacionadas e que envolvem a mobilização de esquemas de ação e representação (Vergnaud, 1982). A aplicação dessa teoria possibilita uma análise aprofundada do desenvolvimento e da aplicação dos conhecimentos dos estudantes em diferentes situações, servindo como um referencial para avaliar as atividades realizadas ao longo da UEPS.

3.1 TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Apresentamos nesta seção alguns dos conceitos da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel que foram a base para a construção da proposta para essa pesquisa.

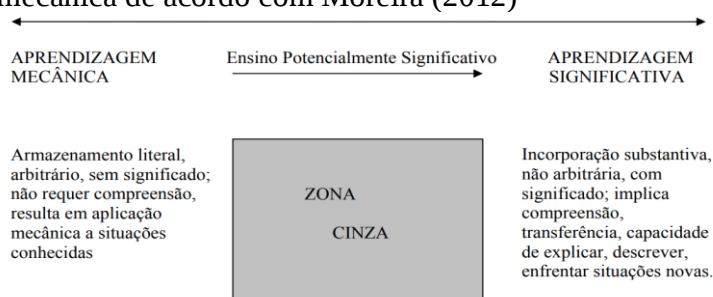
De acordo com Moreira (1999) uma teoria representa uma abordagem para compreender, explicar, antecipar e solucionar questões, sendo essencialmente uma tentativa humana de organizar o conhecimento. Dessa forma, uma teoria de aprendizagem é uma construção destinada a interpretar o processo de aprendizagem. De acordo com o autor, quando a aprendizagem é de natureza cognitiva, centrada na cognição (o ato de conhecer), ocorre por meio do armazenamento organizado de informações e conhecimentos, resultando na formação da estrutura cognitiva.

Assim, a base da teoria de David Ausubel encontra-se centrada na estrutura cognitiva do estudante, isto é, no conhecimento prévio relevante que ele já possui, e seu conceito fundamental é a Aprendizagem Significativa. Ausubel (2003) define a aprendizagem significativa como o processo pelo qual uma nova informação se conecta a um aspecto relevante da estrutura de conhecimento já presente no indivíduo. Os elementos relevantes do conhecimento do estudante aos quais o autor faz referência são os chamados subsunçores. Para Moreira (2012), subsunçor é

o nome que se dá a **um conhecimento específico**, existente na estrutura de conhecimentos do indivíduo, que permite **dar significado a um novo conhecimento** que lhe é apresentado ou por ele descoberto. Tanto por recepção como por descobrimento, a atribuição de significados a novos conhecimentos depende da existência de conhecimentos prévios especificamente relevantes e da interação com eles (Moreira, 2012, p. 30).

Portanto, reconhecer os conhecimentos prévios que os estudantes trazem consigo para a sala de aula é indispensável para facilitar o processo ensino-aprendizagem (Calheiro, 2018). Ausubel (2000) também caracteriza a aprendizagem de novas informações com pouca ou nenhuma conexão com conceitos relevantes já presentes na estrutura cognitiva como aprendizagem mecânica, ou seja, aquela que ocorre uma assimilação literal das informações, como é comum durante a preparação para uma avaliação, em que as respostas são fornecidas de forma direta, sem estabelecer vínculos com outros conhecimentos já adquiridos pelo estudante. Esse tipo de aprendizagem resulta na retenção temporária do conhecimento, utilizado apenas durante o período da avaliação e, em seguida, descartado (Calheiro, 2014). Dessa forma, cabe ressaltar que a aprendizagem significativa e a aprendizagem mecânica não são opostas distintos, mas sim pontos ao longo de uma “linha” contínua. Moreira (2012) define essa ideia de acordo com a figura 2.

Figura 2 – Uma visão esquemática do contínuo aprendizagem significativa aprendizagem mecânica de acordo com Moreira (2012)



Fonte: Moreira (2012).

Segundo Moreira (2012, p.13), a existência dessa linha contínua entre a aprendizagem mecânica e significativa sugere que haja algumas implicações: “a passagem da aprendizagem mecânica para significativa não é natural”, de acordo com o autor não é possível que a aprendizagem mecânica evolui naturalmente para uma aprendizagem significativa, ou seja, é essencial que os novos conhecimentos se conectem de forma significativa aos conhecimentos prévios relevantes do estudante. O autor destaca, também, que a aprendizagem significativa é um processo dinâmico e contínuo, marcado por avanços e retrocessos, é “progressiva” e pode ser bastante longo” (Moreira, 2012, p.13). O autor, salienta que a “aprendizagem significativa depende da capacitação de significados” e que O “significado é a parte mais estável do sentido e este depende do domínio progressivo de situações-problema, situações de aprendizagem”.

Outro aspecto da teoria proposta por David Ausubel, ocorre em situações em que o estudante não possui conhecimentos prévios que possam servir como base para a compreensão de novos conceitos, neste aspecto Ausubel (2003) sugere o emprego de organizadores prévios. Estes organizadores, apresentados antes do conteúdo principal, têm o intuito de preparar o terreno cognitivo do aprendiz, facilitando assim a assimilação e compreensão dos novos materiais a serem aprendidos.

Esses organizadores vão além de simples materiais introdutórios, segundo Moreira (2012) eles devem também:

1. Identificar os conceitos e ideias que os estudantes já possuem sobre o tema, estabelecendo uma base para a construção de novos conhecimentos.
2. Apresentar o novo conteúdo de forma ampla e abrangente, destacando as relações entre os diferentes conceitos e ideias.
3. Contextualizar o novo material, relacionando-o com os conhecimentos prévios dos estudantes e com situações reais, facilitando a compreensão e a retenção das informações.

Desse modo, Moreira (2021) destaca que, para Ausubel, os organizadores prévios são elaborados com o objetivo de facilitar a aprendizagem de tópicos específicos ou de ideias intimamente relacionadas. O formato desses materiais não é um fator determinante, podendo assumir diferentes formas, como questões, textos, vídeos, simulações ou atividades experimentais, desde que sejam apresentados antes do conteúdo principal a ser desenvolvido em sala de aula (Calheiro, 2018, p. 63).

Nesse contexto, tanto os subsunçores quanto os organizadores prévios desempenham um papel fundamental na ocorrência da aprendizagem significativa. Ausubel (2003) também enfatiza outros fatores para que essa aprendizagem ocorra, como a disposição do estudante para aprender e o material potencialmente significativo do conteúdo a ser estudado.

Complementando essa perspectiva, Moreira (2011) argumenta que a estrutura cognitiva do indivíduo é dinâmica e em constante transformação. Essa dinamicidade é impulsionada, segundo o autor, por dois processos: a diferenciação progressiva, que amplia e detalha conceitos já existentes, e a reconciliação integrativa, que promove a conexão entre novos conhecimentos e ideias previamente adquiridas.

A diferenciação progressiva refere-se à tendência da estrutura cognitiva de se tornar cada vez mais diferenciada e complexa. À medida que o indivíduo adquire novos conhecimentos, ele diferencia os conceitos mais gerais em conceitos mais específicos, criando uma hierarquia de ideias. Essa diferenciação permite uma compreensão mais profunda e detalhada do mundo (Ausubel, 2003; Moreira, 2011). Já a reconciliação integrativa é o processo de relacionar e integrar novos conhecimentos aos já existentes na estrutura cognitiva. Ao fazer conexões entre diferentes conceitos, o indivíduo constrói uma visão mais coerente e abrangente do conhecimento. Dessa forma, a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa ocorrem de forma simultânea e interdependente, moldando a estrutura cognitiva do indivíduo ao longo da vida (Ausubel; Novak; Hanesian, 1980).

Moreira (2011) ressalta que a aprendizagem significativa é um processo ativo e construtivo, no qual o estudante não apenas recebe informações, mas as integra de forma consciente à sua estrutura cognitiva, estabelecendo conexões com conhecimentos previamente adquiridos. Essa incorporação ativa é mediada por mecanismos como a diferenciação progressiva, que amplia e especifica conceitos existentes, e a reconciliação integrativa, que promove a articulação entre novas e antigas ideias, aprofundando a compreensão (Ausubel, 2003; Moreira, 2011). Para que esse processo ocorra, é essencial que o professor proponha atividades que estimulem a reflexão, a análise crítica e a comparação de conceitos, criando condições para que o estudante construa significados próprios. Com base nesses princípios, desenvolvemos neste projeto uma unidade de ensino voltada à promoção da aprendizagem significativa no contexto escolar.

3.2 UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA - UEPS

A pesquisa foi desenvolvida com base na construção e implementação de uma UEPS, com o objetivo de facilitar a aprendizagem significativa no campo conceitual da Radioatividade. Essa proposta, formulada por Moreira (2011), consiste em uma sequência didática fundamentada em teorias da aprendizagem, especialmente na perspectiva de David Ausubel, cuja abordagem promove a integração de novos conhecimentos à estrutura cognitiva prévia do estudante.

Um dos objetivos da UEPS é que os materiais, atividades e recursos pedagógicos sejam intencionalmente planejados para promover a aprendizagem significativa. Nesse sentido, Moreira (2011) afirma que o conteúdo a ser ensinado deve ser potencialmente significativo, ou seja, relevante e compreensível para o estudante, além de ancorado aos seus conhecimentos prévios. Para orientar esse processo, o autor propõe um conjunto de princípios que devem nortear a elaboração de uma UEPS:

- O conhecimento prévio é a variável que mais influencia a aprendizagem significativa (Ausubel);
- pensamentos, sentimentos e ações estão integrados no ser que aprende; essa integração é positiva, construtiva, quando a aprendizagem é significativa (Novak);
- é o estudante quem decide se quer aprender significativamente determinado conhecimento (Ausubel; Gowin);
- organizadores prévios mostram a relacionalidade entre novos conhecimentos e conhecimentos prévios;
- são as situações-problema que dão sentido a novos conhecimentos (Vergnaud); elas devem ser criadas para despertar a intencionalidade do estudante para a aprendizagem significativa;
- situações-problema podem funcionar como organizadores prévios;
- as situações-problema devem ser propostas em níveis crescentes de complexidade (Vergnaud);
- frente a uma nova situação, o primeiro passo para resolvê-la é construir, na memória de trabalho, um modelo mental funcional, que é um análogo estrutural dessa situação (Johnson-Laird);
- a diferenciação progressiva, a reconciliação integradora e a consolidação devem ser levadas em conta na organização do ensino (Ausubel);
- a avaliação da aprendizagem significativa deve ser feita em termos de buscas de evidências; a aprendizagem significativa é progressiva;
- o papel do professor é o de provedor de situações-problema, cuidadosamente selecionadas, de organizador do ensino e mediador da captação de significados de parte do estudante (Vergnaud; Gowin);
- a interação social e a linguagem são fundamentais para a captação de significados (Vygotsky; Gowin);
- um episódio de ensino envolve uma relação triádica entre estudante, docente e materiais educativos, cujo objetivo é levar o estudante a captar e compartilhar significados que são aceitos no contexto da matéria de ensino (Gowin);
- essa relação poderá ser quadrática na medida em que o computador não for usado apenas como material educativo;
- a aprendizagem deve ser significativa e crítica, não mecânica (Moreira);
- A aprendizagem significativa crítica é estimulada pela busca de respostas (questionamento) ao invés da memorização de respostas conhecidas, pelo uso

da diversidade de materiais e estratégias instrucionais, pelo abandono da narrativa em favor de um ensino centrado no estudante (Moreira, 2011, p. 3).

Com o objetivo de favorecer a aprendizagem significativa no contexto escolar, Moreira (2011) propõe a elaboração de UEPS, estruturadas a partir de oito passos. Esses passos servem como diretrizes para o planejamento e a organização pedagógica da unidade, assegurando a intencionalidade didática e a articulação entre os novos conhecimentos e os conhecimentos prévios dos estudantes. A seguir, apresentamos de forma sintetizada cada um desses aspectos, conforme propostos pelo autor.

1. Definição do conceito: Definir de forma clara e objetiva os objetivos de aprendizagem para que os estudantes compreendam o que se espera deles ao final da unidade.
2. Investigação dos conhecimentos prévios: Criar um ambiente que incentive os estudantes a compartilharem seus conhecimentos prévios, estabelecendo um ponto de partida para a construção de novos saberes.
3. Situações-Problema Introdutórias: Apresentar o conteúdo de forma contextualizada, relacionando-o com experiências e conhecimentos do mundo real dos estudantes.
4. Diferenciação Progressiva: Organizar o conteúdo de forma sequencial, partindo do geral para o específico, facilitando a compreensão dos estudantes.
5. Complexidade: Proporcionar atividades que desafiem os estudantes a aplicar os novos conhecimentos em diferentes contextos, desenvolvendo habilidades de resolução de problemas.
6. Reconciliação integrativa: Estabelecer conexões entre os diferentes conceitos abordados, promovendo a construção de uma visão integrada do tema.
7. Avaliação: Registrar durante a intervenção, todas as possíveis pistas de evolução conceitual, sugerindo uma aprendizagem significativa.
8. Efetividade: Realizar uma avaliação contínua do processo de aprendizagem, coletando evidências do desenvolvimento conceitual dos estudantes ao longo de toda a unidade. Essa avaliação deve priorizar o acompanhamento do progresso em relação aos objetivos de aprendizagem, em vez de se concentrar apenas no resultado final.

A construção de uma UEPS, conforme os oito passos propostos por Moreira (2011), requer do professor a seleção e a adaptação de estratégias e recursos didáticos variados. Entendemos, que a escolha das abordagens mais adequadas deve considerar as características dos estudantes, o conteúdo a ser trabalhado e o contexto educacional em que estão inseridos.

Nesse sentido, os aspectos sequenciais da UEPS possibilitam a investigação de indícios de aprendizagem significativa relacionados ao tema estudado. As situações-problema propostas ao longo da unidade apresentam diferentes níveis de complexidade, o que permite analisá-las sob a ótica da Teoria dos Campos Conceituais, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada da construção do conhecimento pelos estudantes.

3.3 TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS

Tomamos a Teoria dos Campos Conceituais (TCC), elaborada por Gerard Vergnaud, como referencial teórico de análise dos resultados da nossa pesquisa. A teoria tem como foco compreender o desenvolvimento do sistema cognitivo e o processo de aprendizado de habilidades mais complexas. Seu objetivo é oferecer uma base explicativa para os estudos que analisam as conexões e transformações que a aprendizagem promove nas pessoas. Com base nesse referencial, planejaremos atividades estruturadas em situações-problema com diferentes níveis de complexidade, conforme definido por Moreira (2002):

A Teoria dos Campos Conceituais é uma teoria cognitivista neopietetiana que pretende oferecer um referencial mais frutífero do que o piagetiano ao estudo do desenvolvimento cognitivo e da aprendizagem de competências complexas, particularmente aquelas implicadas nas ciências e na técnica, levando em conta os próprios conteúdos do conhecimento e a análise conceitual de seu domínio (Moreira, 2002, p. 8).

A Física Moderna, assim como a Mecânica e outras áreas da Física, possuem vários campos conceituais, portanto, são difíceis de entender imediatamente, nem como um sistema conceitual, nem como um conceito isolado. Dessa forma, é necessário um ponto de vista desenvolvimentista na sua abordagem (Moreira, 2002; Calheiro, 2018). O campo conceitual, segundo Vergnaud (1990), é definido como conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição. A definição de campos conceituais destaca a relação imediata entre situações e conceitos que queremos explorar. Isso mostra que o campo conceitual nunca é formado por um conceito, mas por múltiplos conceitos, da mesma forma, um conceito não pode ser formado por uma única situação, mas por múltiplas situações.

Para Vergnaud (1990), o conhecimento é adquirido por meio das situações. Para a construção do conceito, os estudantes precisam: “não somente de uma definição por enunciado e textos, mas também daquilo que está subjacente às competências e permite a ação operatória”. Aqui entendemos competência como a capacidade do sujeito de enfrentar e resolver situações. Essas competências são construídas na experiência pessoal, nas relações sociais e no conhecimento adquirido. A maior parte do nosso conhecimento é competência, mas apenas parte dele é fácil de explicar segundo Vergnaud (1998).

Quando nos deparamos com uma situação conhecida, usamos um padrão conhecido. Quando nos deparamos com novas situações, buscamos aquisições, novas estratégias, estabelecimento de novas soluções, e desenvolvimento de novas habilidades. Nestas ações, estão implícitos conhecimentos, procedimentos e representação.

Dessa forma, nessas ações que Vergnaud organiza os Campos Conceituais, tendo como eixo central a conceitualização. No quadro 4 descrevemos as ideias centrais da Teoria dos Campos Conceituais segundo Gerard Vergnaud.

Quadro 4 – Ideias centrais que abrangem a Teoria dos Campos Conceituais

Conjunto	Definição	Exemplo prático
<i>C (Conceito)</i>	Conceitos fundamentais que estruturam o campo conceitual e são mobilizados para compreender as situações. É descrito pelo conjunto $C = S, I, R$	- Meia-vida. - Radiação alfa, beta e gama. - Decaimento radioativo.
<i>S (Situações)</i>	Conjunto de situações ou problemas que demandam a mobilização de conceitos para serem resolvidos.	Um estudante precisa determinar o tempo necessário para que a atividade de uma amostra radioativa caia para um quarto do valor inicial.
<i>I (Invariantes Operatórios)</i>	Conceitos, propriedades ou relações que o indivíduo mobiliza para interpretar e resolver uma situação.	- Relação entre meia-vida e constante de decaimento. - Propriedade exponencial do decaimento radioativo. - Conservação da massa e energia em reações nucleares.
<i>R (Representações)</i>	Formas simbólicas, gráficas, algébricas ou linguísticas utilizadas para expressar os conceitos e relações envolvidos.	- Equação $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ - Gráfico de decaimento radioativo. - Esquema do núcleo emitindo partículas alfa.
<i>Esquemas</i>	Conjunto estruturado de ações e operações mentais que um indivíduo utiliza para interpretar e agir diante de uma situação.	- Resolver problemas aplicando a equação de decaimento radioativo. - Calcular a atividade de um material após certo tempo. - Interpretar o gráfico de desintegração de um radioisótopo.

Fonte: Autor.

O primeiro elemento a ser considerado é o conceito. Segundo Vergnaud (1993), um conceito deve ser entendido como um sistema dinâmico e relacional, que só adquire significado quando analisado em três dimensões interdependentes: as situações nas quais é aplicado, os invariantes operatórios que o sustentam cognitivamente e as representações simbólicas que o expressam. Essa estrutura ficou conhecida como o triplo (S-I-R), onde “S” representa o conjunto de situações de referência, “I” os invariantes operatórios (compostos por conceitos-em-ação e teoremas-em-ação) e “R” o conjunto de representações simbólicas associadas ao conceito. Moreira (2002) reforça que essa definição supera abordagens tradicionais de ensino que tratam conceitos como entidades estáticas e descontextualizadas. Estudos mais recentes, como o de Pantoja (2023) Cunha & Ferreira (2020), têm evidenciado que a compreensão efetiva de um conceito no contexto escolar só se concretiza quando o estudante consegue estabelecer relações entre essas três dimensões. Esse entendimento implica, portanto, que o ensino de ciências não pode restringir-se à transmissão de definições, sendo necessário explorar uma variedade de situações e representações que permitam ao estudante construir e reconstruir os invariantes que dão significado ao conceito.

O segundo elemento importante da TCC é o esquema. De acordo com Vergnaud (1997), os esquemas são estruturas organizadoras da ação, constituídas por um conjunto de regras, metas, inferências e invariantes operatórios que orientam a conduta do sujeito diante de determinadas classes de situações. Trata-se de uma organização invariável do comportamento frente a situações semelhantes, que permite ao sujeito selecionar informações pertinentes, definir estratégias de ação e controlar os resultados obtidos. Moreira (2002) salienta que os esquemas não devem ser confundidos com simples sequências de ações ou procedimentos, uma vez que envolvem elementos cognitivos profundos que regulam a interação do sujeito com o meio. Pesquisas recentes no campo da educação matemática e científica, como a de Messias & Brandemberg (2023), demonstram que dificuldades conceituais muitas vezes decorrem da ativação de esquemas inadequados frente a novas situações-problema. Isso evidencia a necessidade de que o ensino promova oportunidades para que os estudantes ampliem e flexibilizem seus esquemas, favorecendo a superação de respostas intuitivas e a construção de modelos explicativos mais robustos.

O terceiro componente central da TCC refere-se às representações simbólicas. Vergnaud (1990) enfatiza que as representações não são apenas formas de comunicação de conceitos, mas constituem-se como elementos estruturantes do próprio processo de

construção do conhecimento. As representações incluem a linguagem natural, gráficos, diagramas, modelos matemáticos, entre outros registros semióticos, e funcionam como mediadores entre o significado conceitual e as ações desenvolvidas pelos sujeitos. Pantoja (2023) aprofunda essa discussão ao argumentar que a transformação de conhecimentos implícitos em explícitos só ocorre de maneira efetiva quando o estudante é capaz de transitar entre diferentes formas de representação, compreendendo suas potencialidades e limitações. Esse entendimento reforça a importância de que o ensino de ciências integre múltiplos registros de representação, permitindo que os estudantes construam pontes entre diferentes formas de simbolização e os conceitos científicos que se deseja ensinar.

A próxima ideia que abrange a TCC é o conjunto dos Invariantes Operatórios, denominados “conceito-em-ação” e “teorema-em-ação”. O teorema-em-ação refere-se a uma proposição considerada verdadeira sobre a realidade, enquanto o conceito-em-ação representa um objeto ou uma categoria de pensamento relevante para a interpretação e resolução de situações. (Moreira, 2002).

Conceitos-em-ação são noções intuitivas e situacionais, relevantes para resolver problemas, mas nem sempre alinhadas com conceitos científicos. Teoremas-em-ação são proposições pessoais sobre o mundo, que podem ser verdadeiras ou falsas, e que, por estarem implícitas, dificultam a explicitação e a aprendizagem de conceitos científicos mais formais (Delgado, 2023; Calheiro, 2018; Moreira, 2002).

Dessa forma, a identificação dos invariantes operatórios se revela como uma ferramenta importante no processo de construção de um Campo Conceitual. Ao analisar esses invariantes operatórios, é possível acompanhar o possível domínio do campo conceitual. Desse modo, é possível propor atividades que desafiem e auxiliem os estudantes a avançarem em sua aprendizagem.

Por fim, o conceito de situação, para Vergnaud (1993), uma situação não é apenas uma atividade proposta em sala de aula, mas uma configuração específica de tarefas que demanda a mobilização de determinados esquemas e conceitos por parte do sujeito. A variedade e a progressividade das situações são fatores decisivos para o desenvolvimento de novos conhecimentos, pois é a partir da exposição a diferentes tipos de situações que o aprendiz é levado a reestruturar seus esquemas e construir novos invariantes operatórios. Perovano (2020) destaca que uma única situação pode demandar a ativação de múltiplos conceitos e esquemas, evidenciando a complexidade da aprendizagem conceitual. Estudos mais recentes, como os de Fernandes & Fassarella

(2020), têm mostrado que a diversidade de situações de aprendizagem favorece a identificação de dificuldades conceituais, permitindo intervenções pedagógicas mais precisas e eficazes. Assim, a seleção de situações deve ser cuidadosamente planejada pelos professores, de modo a criar desafios cognitivos que estimulem o desenvolvimento de novos esquemas e a apropriação progressiva dos conceitos científicos.

Conforme mencionado por Moreira (2002), a utilização da teoria dos campos conceituais no planejamento e análise de situações de ensino proporciona benefícios ao envolver o desenvolvimento cognitivo e a aprendizagem a partir dos próprios conteúdos e conceitos pertencentes ao domínio em questão. De acordo com Vergnaud (1990), oferecer aos estudantes situações-problema variadas, tanto em nível quanto em natureza, é essencial para o seu desenvolvimento cognitivo. Essas situações, sejam teóricas ou práticas, colocam o estudante em movimento: ele precisa pensar, levantar hipóteses, testá-las e buscar soluções. Essa postura investigativa está diretamente ligada ao modo como as ciências são construídas e compreendidas (Vergnaud, 1998). Embora a Teoria dos Campos Conceituais tenha surgido no campo da Matemática, ela não se limita a essa área. Pelo contrário, vem sendo reconhecida como uma contribuição importante também para o Ensino de Ciências, justamente por permitir entender como os estudantes organizam seus pensamentos e enfrentam desafios conceituais (Nicolette et al., 2021).

No contexto do ensino de FMC, a necessidade dessa teoria se torna significativa, uma vez que, segundo Moreira (2002), a FMC envolve diversos campos conceituais, cuja complexidade impede uma compreensão imediata dos temas. Isso significa que não basta apresentar os conceitos de forma isolada, é preciso criar caminhos para que os estudantes consigam conectar ideias, construir significados e superar as dificuldades comuns nesse conteúdo. Nesse sentido, adotar uma perspectiva pedagógica inspirada na TCC pode ser um passo importante para tornar o ensino da Física mais acessível, significativo e atrativo por parte dos estudantes.

Durante muito tempo, o ensino de Física nas escolas foi marcado por uma abordagem excessivamente técnica, centrada na resolução de problemas matemáticos, sem espaço para refletir sobre os fenômenos físicos em si (Calheiro, 2104). Para Batista & Siqueira (2017), esse modelo levou muitos estudantes a uma aprendizagem mecânica, baseada na memorização de fórmulas, o que acabou deixando um legado de desmotivação e distanciamento do conteúdo por parte dos estudantes, e até dos próprios professores.

Parte das dificuldades enfrentadas hoje pelos docentes ainda está relacionada a essa tradição: a disciplina muitas vezes é reduzida a expressões algébricas e exercícios que exigem um raciocínio puramente matemático, o que pode afastar os estudantes que têm outras formas de pensar e aprender Silva (2019c). Além disso, a geração atual está inserida em uma realidade cada vez mais tecnológica, com acesso constante a mídias interativas e conteúdos dinâmicos, o que torna as aulas convencionais da escola menos atrativas aos seus olhos Nascimento (2022). Nesse cenário, romper com uma visão tecnicista e promover um ensino mais significativo da Física, especialmente quando se trata de temas como a radioatividade.

A Teoria dos Campos Conceituais, proposta por Vergnaud (1990, 1998), oferece um caminho promissor para enfrentar esse desafio. Essa teoria nos mostra que a aprendizagem acontece quando o estudante mobiliza diferentes conceitos, representações e esquemas operatórios para lidar com situações-problema reais ou simuladas. Isso significa que os conhecimentos prévios dos estudantes, aquilo que muitas vezes chamamos de "senso comum", não devem ser ignorados, mas sim acolhidos e problematizados em sala de aula, pois são parte essencial do desenvolvimento de um campo conceitual mais elaborado (Moreira, 2011; Naujorks, 2022).

Ao planejar atividades didáticas sobre radioatividade, é importante considerar essas concepções prévias, muitas vezes marcadas por ideias equivocadas ou estereótipos sobre o tema. Trabalhar com situações que estimulem a reflexão, a análise crítica e a conexão com o cotidiano, como o uso de radiações na medicina, na indústria ou na geração de energia, pode favorecer o domínio do campo conceitual dos estudantes. A aplicação da Teoria dos Campos Conceituais permite, nesse contexto, analisar não apenas se os estudantes acertam ou erram determinadas respostas, mas como pensam, que invariantes operatórios mobilizam e de que forma constroem ou transformam seu entendimento sobre a radioatividade (Vergnaud, 1998; Barcellos & Moreira, 2020).

4. ASPECTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa, de natureza predominantemente qualitativa, busca compreender como as diferentes situações de uma UEPS implementada pode contribuir para o possível domínio do campo conceitual da Radioatividade de estudantes do Ensino Médio. Para Creswell (2007, p.27) o “processo de pesquisa qualitativa é bastante indutivo, com o pesquisador gerando significado a partir dos dados coletados no campo”. Para o autor, na pesquisa qualitativa os investigadores utilizam a literatura de forma alinhada com as suposições de aprendizagem dos participantes, em vez de utilizá-la para ditar as questões que devem ser respondidas a partir da perspectiva do pesquisador. A pesquisa procurou entender como os estudantes do primeiro ano do Ensino Médio, inseridos em uma realidade de ensino específica, se apropriaram dos conceitos relacionados à Radioatividade ao longo das atividades desenvolvidas nas aulas de Física durante a implementação da UEPS.

4.1 CONTEXTO DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida em dois momentos distintos. No primeiro, foi implementado um projeto piloto da UEPS, desenvolvido no segundo semestre de 2023, na Escola Estadual Zélia Quevedo Chaves (Figura 3), com a participação de 62 estudantes do terceiro ano do Ensino Médio. Devido a circunstâncias adversas, essa fase inicial foi tratada como piloto, conforme detalhado na seção 4.2. No segundo momento, a UEPS foi implementada em sua totalidade, com base nos ajustes realizados a partir da experiência preliminar.

Figura 3 – Escola Estadual Zélia Quevedo Chaves



Fonte: Autor.

Num segundo momento, a UEPS foi reorganizada a partir da análise das atividades que, na primeira aplicação, mostraram melhor resultado com os estudantes, realizando-se ajustes significativos naquelas que apresentaram limitações. Essa nova versão foi aplicada no primeiro semestre de 2024, na Escola Estadual José Alves Quito (Figura 4), uma escola pública de tempo integral localizada no município de Corguinho, em Mato Grosso do Sul. A aplicação ocorreu com duas turmas do 1º ano do Ensino Médio, na disciplina de Unidade Curricular II das Ciências da Natureza, em consonância com o Referencial Curricular de Mato Grosso do Sul, no qual o tema da radioatividade está inserido. O pesquisador atuou como professor regente da disciplina, o que possibilitou um acompanhamento contínuo e integrado de todas as etapas da proposta. Apesar de inicialmente contarmos com aproximadamente 34 estudantes (cerca de 17 em cada turma), fatores como faltas frequentes, transferências e abandono escolar reduziram o número efetivo de participantes. Assim, foram selecionados 25 estudantes que estiveram presentes em todas as etapas da pesquisa, com idades entre 14 e 17 anos.

Figura 4 – Escola Estadual José Alves Quito



Fonte: Autor.

4.1.1 Aspectos Éticos da Pesquisa

Esta pesquisa seguiu todos os princípios éticos estabelecidos para estudos com seres humanos, conforme as diretrizes do Conselho Nacional de Saúde. O projeto foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos, registrado CAAE: 70523323.8.0000.0021, conforme comprovante apresentado no Anexo A.

Todos os participantes foram informados sobre os objetivos da pesquisa, os procedimentos adotados, os possíveis riscos e benefícios, e tiveram sua participação autorizada mediante assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE e do Termo de Assentimento Livre e Esclarecido – TALE. O anonimato, a confidencialidade dos dados e o direito de desistência foram garantidos em todas as etapas do estudo, conforme previsto nas normativas éticas vigentes.

4.2 PROJETO PILOTO

Inicialmente, como já mencionado, a proposta foi implementada com estudantes do terceiro ano do Ensino Médio no 4º bimestre do ano letivo de 2023. Na Figura 4 apresentamos algumas das atividades desenvolvidas com a turma, incluindo o jogo “Dado Radioativo” e o jogo “Dominó Radioativo”.

Figura 5 – Atividades implementadas na implementação do projeto piloto



Fonte: Autor (2024).

Contudo devido aos feriados, provas da secretaria de educação e atividades propostas pela escola durante o quarto bimestre, as aulas previstas para implementação foram reduzidas, dessa forma prejudicando a implementação da UEPS. Considerando que a UEPS não pôde ser integralmente finalizada, optamos por tratar essa etapa como um projeto piloto. A proposta consistiu em analisar as atividades que demonstraram efetividade, revisar e aprimorar aquelas que não alcançaram os resultados esperados,

com o objetivo de viabilizar uma nova implementação em outra turma com ajustes fundamentados na experiência inicial.

4.2.1 Considerações sobre o projeto Piloto

Na reestruturação das atividades que compõem a UEPS, foram priorizadas aquelas que demonstraram maior efetividade, com base na análise de evidências de aprendizagem observadas e relatos de estudantes durante a implementação piloto. A seleção e reorganização das atividades também consideraram sua capacidade de promover a compreensão conceitual dos estudantes e de favorecer a participação ativa nos diferentes momentos da unidade didática. Ao longo da aplicação, foram implementadas, em média, sete atividades distribuídas entre os passos da UEPS, respeitando a lógica progressiva da construção do conhecimento. O Quadro 5 apresenta uma análise comparativa entre as ações desenvolvidas na fase piloto e as modificações realizadas na versão reestruturada, evidenciando os critérios que orientaram as mudanças e os objetivos específicos de cada atividade reformulada

Quadro 5 – Comparativo das atividades desenvolvidas no projeto piloto e na implementação final da sequência didática

Passo	Projeto Piloto	Implementação final
Passo 1: Conceitos propostos para a UEPS	Estrutura do átomo, emissões radioativas, meia-vida, decaimento radioativo, séries de decaimento, penetrabilidade da radiação, isótopos, proteção radiológica e aplicações, principais experimentos e cientistas do contexto da radioatividade.	Estrutura do átomo, emissões radioativas, meia-vida, decaimento radioativo, séries de decaimento, penetrabilidade da radiação, isótopos, proteção radiológica e aplicações.
Passo 2: Atividade para levantamento dos conhecimentos prévios	Utilização de imagens e cenas variadas, onde estavam presentes tipos de radiação. Os estudantes descreviam como achavam que a radiação estava presente e qual era o papel dela naquele contexto.	Utilização de um recorte de notícia sobre radioatividade como organizador prévio e um questionário relacionado a conceitos básicos de radiação.
Passo 3: Atividade introdutória	Utilização do simulador “Monte um átomo” para introduzir/revisar os conceitos de estrutura da matéria e introduzir os assuntos de radioatividade.	Não foi alterado.
Passo 4: Diferenciação progressiva	Estudo ativo sobre as descobertas, experimentos e cientistas do contexto da radioatividade, além de conceitos relacionados ao tema, todos definidos no passo 1.	Momento 1: Estudo ativo dos conceitos definidos no Passo 1. Momento 2: Jogo “Dado radioativo” para aprofundamento em decaimento, desintegração, meia-vida e velocidade de desintegração. Jogo “Dominó radioativo” para contextualizar emissões radioativas, séries de decaimento, estabilidade atômica e meia-vida.

Passo 5: Complexidade	Experimentos e jogos didáticos relacionados aos temas estudados, como os “Dados radioativos”.	Utilização de recortes de notícias como organizadores prévios para que os estudantes identificassem os conceitos de radioatividade presentes.
Passo 6: Reconciliação integrativa	Utilização de um jogo de tabuleiro com perguntas e respostas como forma de integrar os conceitos estudados.	O jogo de tabuleiro foi utilizado, com modificações nas perguntas, considerando as adaptações feitas para a implementação.
Passo 7: Avaliação	Avaliação somativa.	Não foi alterado.
Passo 8: Efetividade	Atividades realizadas durante a unidade.	Não foi alterado.

Fonte: Autor.

Dessa forma, considerando os resultados positivos obtidos no projeto piloto, optamos por manter a atividade com simulador como ponto de partida para o estudo da radioatividade, pois ao familiarizar os estudantes com a estrutura atômica, o simulador facilitou a compreensão dos processos radioativos. O *feedback* positivo dos estudantes em relação ao jogo de tabuleiro, em particular, reforçou a importância de atividades que combinem aprendizagem e ludicidade.

Por outro lado, optamos por reduzir o enfoque na história da radioatividade, no qual inicialmente teria um passo específico para o estudo da história e filosofia da radioatividade. Optamos por dedicar mais atenção aos conceitos fundamentais, pois entendemos que a introdução da parte histórica necessitaria de mais tempo para ser abordada, pois o tempo disponível para implementação era reduzido.

Além disso, incorporamos o “dominó radioativo” como uma nova ferramenta para ilustrar os processos de emissão radioativa. Essa escolha se baseia no *feedback* positivo recebido das atividades com jogos, além de contribuir para a diversificação das estratégias de ensino.

Embora não estivesse inicialmente planejado, a implementação de um projeto piloto revelou-se essencial para a adaptação e aprimoramento dos passos da UEPS. Esse projeto piloto possibilitou uma avaliação parcial dos conhecimentos prévios dos estudantes, permitindo ajustar as atividades. Esse processo de avaliação e *feedback* foi importante, o que contribuiu para que a UEPS atendesse melhor às necessidades dos estudantes e promovesse uma aprendizagem com significados do campo conceitual da Radioatividade.

4.3 INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados foi realizada a partir das respostas fornecidas pelos estudantes ao longo das diferentes atividades e metodologias aplicadas em cada etapa da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). As atividades foram desenvolvidas com o auxílio de diversos instrumentos, tais como questionários, produções textuais, jogos didáticos, avaliações escritas e registros das ações realizadas durante as atividades práticas. A análise dos dados será conduzida com uma abordagem qualitativa, centrando-se na identificação e interpretação dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes ao longo do processo de aprendizagem. Especificamente, serão analisados os conceitos-em-ação e teoremas-em-ação expressos nas respostas e estratégias utilizadas durante a resolução das situações-problema. Essa abordagem possibilitará compreender como os alunos construíram, ajustaram ou consolidaram seus esquemas conceituais sobre o tema da radioatividade. Além disso, a diversidade de instrumentos adotados visa assegurar uma coleta ampla e representativa das distintas formas de expressão dos esquemas de pensamento dos estudantes (Moreira, 2011).

Outro elemento central da análise foi a caracterização das situações-problema propostas em cada passo da UEPS. Seguindo a perspectiva de Vergnaud (1998), cada situação configura-se como o contexto no qual um ou mais conceitos são mobilizados. Por isso, cada atividade foi planejada para provocar desequilíbrios cognitivos intencionais, com o objetivo de estimular a ativação de novos invariantes operatórios ou a reestruturação de esquemas já existentes (Moreira, 2011).

Ao longo da análise, os dados foram organizados com base nas regularidades observadas nas condutas dos estudantes frente às situações apresentadas, em um processo de triangulação entre os diferentes instrumentos de coleta. Essa categorização permitiu a identificação de níveis compreensão conceitual sobre a radioatividade, possibilitando mapear indícios de aprendizagem significativa na forma operatória, como sugere Moreira (2011), ao integrar a TCC com os princípios da aprendizagem significativa de Ausubel.

4.4 DESCRIÇÃO DA UEPS

A seguir, apresentamos de forma detalhada a UEPS elaborada para essa pesquisa, cujos os materiais complementares encontram-se organizados nos apêndices correspondentes a cada passo. A construção da UEPS foi orientada pelos princípios

propostos por Moreira (2011), adotando os aspectos sequenciais sugeridos por ele, conforme descrito na seção 3.2.

Durante o desenvolvimento da unidade, foram utilizados diferentes recursos didáticos, contemplando tanto estratégias individuais quanto práticas colaborativas, mobilizadas a partir das situações-problema. No contexto da UEPS, detalhamos e ilustramos as atividades realizadas. Os resultados obtidos a partir dessas atividades serão analisados e discutidos no capítulo 5 do presente trabalho. Na sequência apresentamos os oito passos da UEPS implementada.

4.4.1 Passos da UEPS

1º PASSO – Definição dos conceitos e objetivos

Objetivos: Promover a compreensão dos fenômenos e dos conceitos fundamentais relacionados ao campo conceitual da Radioatividade; Identificar, por meio das atividades da UEPS, a ocorrência de um possível domínio desse campo conceitual pelos estudantes.

Conceitos: Estrutura do átomo, Emissões radioativas, meia-vida, decaimento radioativo, séries de decaimento radioativo, penetrabilidade radioativa, isótopos, proteção radiológica e aplicações.

Habilidades trabalhadas: As habilidades mobilizadas durante a implementação da UEPS foram selecionadas em conformidade com o Currículo de Referência do Estado de Mato Grosso do Sul, garantindo o alinhamento entre a proposta didática desenvolvida e as diretrizes educacionais oficiais vigentes.

(MS.EM13CNT201) Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente.

(MS.EF09CI06.s.06) Classificar as radiações eletromagnéticas por suas frequências, fontes e aplicações, discutindo e avaliando as implicações de seu uso em controle remoto, telefone celular, raio X, forno de micro-ondas, fotocélulas etc.

(MS. EF09CI07.s.07) Discutir o papel do avanço tecnológico na aplicação das radiações na medicina diagnóstica (raio X, ultrassom, ressonância nuclear magnética) e no tratamento de doenças (radioterapia, cirurgia ótica a laser, infravermelho, ultravioleta etc.).

2º PASSO – Investigação dos conhecimentos prévios

Foram propostas duas atividades com o objetivo de investigar os conhecimentos prévios dos estudantes.

a. Situação Inicial 1 – Essa situação teve por objetivo investigar os conhecimentos prévios sobre radioatividade, utilizando uma notícia veiculada pela mídia (Figura 6). Os estudantes receberam uma reportagem com o título **“Veículo que transportava material radioativo capota em Goiás; bombeiros são acionados¹”**. Antes da leitura da reportagem, foi solicitado aos estudantes que respondessem a uma questão-chave.

Questão- chave – *Quando você pensa em radioatividade, que imagens vêm à sua mente? Explique as relações das imagens com o conceito de radioatividade.*

Situação Inicial 1 – Leia atentamente a reportagem proposta e, com base nas informações apresentadas, responda às questões a seguir. Busque relacionar os dados do texto com seus conhecimentos prévios.

Figura 6 – Notícia veiculada pela mídia apresentada aos estudantes

Veículo que transportava material radioativo capota em Goiás; bombeiros são acionados

Equipe da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) também esteve no local; não houve contaminação



Bombeiros e Comissão Nacional de Energia Nuclear estiveram no local do acidente. Divulgação/Corpo de Bombeiros de Goiás

Um veículo que transportava material radioativo capotou na BR-153, em Goiás, na segunda-feira (17). O Corpo de Bombeiros foi acionado para atender a ocorrência.

Uma equipe da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) também esteve no local. O material foi identificado como fluoreto de sódio, radiofármaco utilizado para diagnósticos médicos.

Segundo os Bombeiros, após os procedimentos para armazenamento e transporte, foi realizada a verificação de radioatividade. Não foi identificada contaminação ou radiação pelo produto.

O material ficou sob os cuidados da CNEN.

Laura Slobodeicov *Lucas Schroeder* CNN
em São Paulo
18/04/2023 às 09:08

Questões:

Q1. Explique o que você entende por material radioativo.

Q2. O que você sabe sobre os efeitos da radioatividade no meio ambiente e na saúde humana?

Q3. Explique os métodos e técnicas utilizados para a detecção e medição da radioatividade.

¹[https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/veiculo-que-transportava-material-radioativo-capota-em-goias-bombeiros-sao-acionados/#:~:text=Um%20ve%C3%ADculo%20que%20transportava%20material,CNEN\)%20tamb%C3%A9m%20esteve%20no%20local](https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/veiculo-que-transportava-material-radioativo-capota-em-goias-bombeiros-sao-acionados/#:~:text=Um%20ve%C3%ADculo%20que%20transportava%20material,CNEN)%20tamb%C3%A9m%20esteve%20no%20local)

Q.4. Descreva quais informações o texto fornece que você não saberia explicar.

Situação Inicial 2 – Aplicação de uma situação relacionando os conceitos iniciais (quadro 6) para o estudo da radioatividade por meio de questões. A atividade completa está descrita no apêndice 3.

Quadro 6 – Conceitos iniciais para o estudo da radioatividade

Conceitos	Como você descreveria o conceito	Como você faria a representação do conceito
Átomo		
Núcleo atômico		
Eletrosfera		
Próton		
Nêutron		
Elétron		
Massa atômica		
Número atômico		
Carga		
Isótopo		
Átomo estável		
Átomo instável		
Meia vida		
Decaimento radioativo		
Cite ou desenhe objetos ou lugares que você pode encontrar radiação.		

3º PASSO – Situações-problema em nível introdutório

Neste passo abordamos conceitos relacionados à estrutura da matéria, como estrutura do átomo, suas partes e partículas constituintes, formação de íons e noções de instabilidade e estabilidade. Foram propostos duas situações-problemas, a primeira tinha como objetivo analisar como os estudantes descreveriam o átomo, e a segunda da aula foi proposta uma atividade com simulador Phet “Monte um átomo” para estudarem as interações atômicas e dar início ao assunto de radioatividade.

Situação-problema 1 – Ao longo da história da ciência, diversas teorias e modelos foram propostos para explicar do que as coisas são feitas. Por exemplo, na Grécia Antiga, filósofos propuseram a teoria dos quatro elementos - terra, água, fogo e ar - como as substâncias fundamentais que compõem todas as coisas. Levando em consideração essas diferentes perspectivas, como você descreveria as principais ideias para explicar do que as coisas são feitas? Faça um desenho e um texto para explicar do que as coisas são feitas?

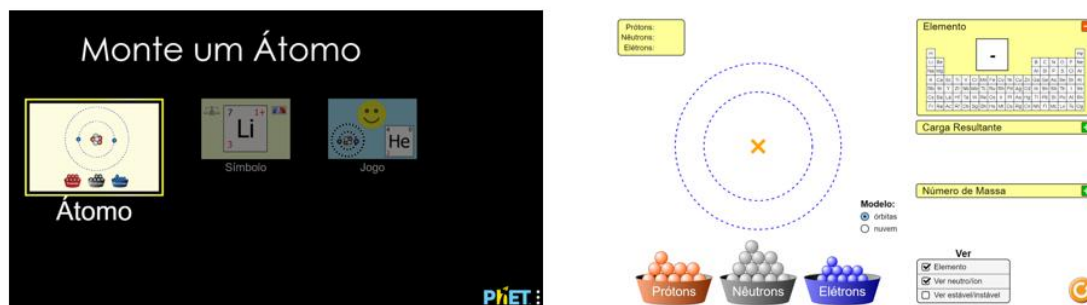
Situação problema 2 - Como você definiria um átomo? Ilustre sua resposta.

A segunda parte foi desenvolvida no simulador, onde orientamos os estudantes para seguirem as seguintes etapas:

1ª – Acesse o simulador do Phet “Monte um átomo” (Figura 7) e abra a janela **Átomo** no link:

https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_pt_BR.html

Figura 7 – S Simulador utilizado na atividade



Fonte: https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_pt_BR.html

2ª Ative as opções: modelo órbita, ver nome de elemento, ver nêutron/íon e ver estável/instável.

3ª Responda as questões propostas.

- I. O que acontece quando você arrasta um próton para o átomo? Onde ele se localiza?
- II. O que acontece quando você arrasta um elétron para o átomo? Onde ele se localiza?
- III. O que acontece quando você arrasta um nêutron para o átomo? Onde ele se localiza?
- IV. Qual elemento formou?
- V. Para o átomo formado mude a configuração e complete a representação no átomo:
- VI. Adicione prótons ao átomo que você fez. O que muda?
- Adicione nêutrons ao átomo que você fez. O que muda?
- Adicione elétrons ao átomo que você criou. O que muda?
- VII. Ao modificar os elementos no átomo, qual/quais influenciam no número de massa do átomo? Por que apenas esses elementos interferem no número massa?

- VIII. Ao modificar os elementos no átomo, qual/quais influenciam na carga do átomo? Como os átomos se transformam em íons positivos (cátions) ou íons negativos (ânions)? O que diferencia um átomo de um íon?
- IX. Ao modificar os elementos no átomo, que fatores influenciam na instabilidade/estabilidade do átomo? Detalhe o processo feito para chegar às suas conclusões.
- X. Um átomo pode ter mais de uma forma estável? Justifique dando um exemplo da sua resposta utilizando o simulador.

4º PASSO – Diferenciação progressiva

Neste passo foram introduzidos os conceitos de emissões, meia vida, decaimento radioativo e penetrabilidade. Neste passo começamos com os aspectos mais gerais, partindo da ideia inicial do todo. Estes conceitos foram apresentados e discutidos em sala de aula durante a apresentação de slides.

Foram trabalhados os conceitos de emissões, meia vida, decaimento radioativo e penetrabilidade. Os conceitos foram apresentados e debatidos em sala de aula durante a apresentação de slides e atividades experimentais. Neste momento procuramos introduzir e desenvolver conceitos através de questões chaves (quadro 5). Ao final das aulas foram desenvolvidos dois experimentos. Os slides encontram-se no apêndice 4.

Quadro 7 – Questões chaves utilizadas durante o passo 4

	Questões-chave	Objetivos
Questão chave 1	O Hulk é uma figura icônica dos quadrinhos, originado quando o cientista Bruce Banner estava conduzindo experimentos com partículas radioativas e, por acidente, ficou preso na câmara onde esses experimentos estavam ocorrendo. Como resultado, ele foi exposto a essas radiações, causando uma alteração em seu DNA e dando origem ao Hulk, uma espécie de álter ego. Embora saibamos que isso seja puramente ficção, as radiações são uma realidade. O que você entende sobre as partículas radioativas? Elas podem afetar a matéria ou o DNA assim como na criação do Hulk? Explique seu pensamento	O objetivo é que o estudante perceba a emissão radioativa como um fenômeno que induz transformações na matéria.
Questão chave 2	Quando se constrói uma sala de exames radiológicos, um dos procedimentos de segurança empregados é o revestimento das paredes com chumbo. Por que isso é essencial?	O objetivo é que o estudante perceba que é necessário materiais específicos para a proteção contra a radioatividade, e posteriormente fazer a relação com o poder de penetração de cada tipo de radiação.

Questão chave 3	Abaixo apresentamos uma gif animada mostrando um fenômeno radioativo. Descreva/explice o que você está observando na gif ²	A partir da gif, o estudante deve ser capaz de visualizar os núcleos estão emitindo um tipo de partícula, e por consequência a sua configuração está se alterando.
-----------------	---	--

Fonte: Autor (2024).

Atividade Prática 1 – Na atividade prática o experimento 1 foram trabalhados os conceitos de decaimento, emissões e series radioativas. Está atividade consiste no estudante montar um “jogo” de dominó radioativo (figura 8), que com os conceitos de emissão radioativa, onde ao final do jogo ele terá uma série radioativa completa.

A atividade foi adaptada do trabalho de Batista e Siqueira (2017), onde utilizamos uma cortadora laser, disponível no laboratório Ciência Maker, para cortar e gravar as peças utilizadas.

Figura 8 – Estudantes realizando a atividade com o “dominó radioativo”



Fonte: Autor (2024).

Para a atividade foi utilizado um roteiro experimental, juntamente com questões relacionadas aos assuntos e conceitos aplicados dentro da atividade. A seguir descrevemos o roteiro detalhado.

Roteiro e questões da atividade - Dominó radioativo

Situação problema: Você é um cientista que trabalha em um laboratório de pesquisa nuclear. Recentemente, sua equipe descobriu um novo elemento radioativo,

² <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1oU0DRPS14eMAZ5MP8UBoIRBI4t-v7QcP>

chamado Elemento X. Durante as investigações, vocês perceberam que o Elemento X faz parte de uma série radioativa natural, mas ainda não têm todas as informações sobre sua composição e seus produtos de decaimento. Durante um experimento de laboratório, vocês observaram que o Elemento X emite radiação e, ao longo do tempo, se transforma em outro elemento, chamado Elemento Y. No entanto, não está claro quais são os produtos de decaimento subsequentes na série. Que informações nós precisamos para definir essa série radioativa? Explique.

Experimento: Dominó radioativo

1º Pegue uma peça do dominó

2º Observe o tipo de emissão indicada na peça.

3º A partir do conceito dessa emissão, deduza o próximo elemento da série radioativa.

4º Repita isso até completar toda a série.

Questionário:

Q.1 Por quê a série parou no elemento Chumbo (Pb)?

Q.2 Ao decorrer da série alguns elementos se repetem, como o Tório (Th), mas eles não são iguais. O que diferencia um do outro? Como chamamos essas variações? Explique.

Q.3 Faça um pequeno texto descrevendo qual foi o processo e estratégias/conceitos que você utilizou para montar a série.

Atividade 2 - O estudo dos conceitos de decaimento radioativo e do de meia-vida foram abordados nesta atividade por meio da adaptação de uma atividade proposta por Bertti et al. (2023). Utilizando um conjunto de 80 dados poliédricos confeccionados em impressora 3D (figura 9) no laboratório Ciência Maker do nosso grupo de pesquisa, que simulam o decaimento radioativo. Cada dado, representando um núcleo atômico instável, onde possuía uma face diferenciada com uma marcação específica. Ao lançar os dados e considerar como decaimento a ocorrência da face marcada para cima, foi possível simular o decaimento radioativo de forma lúdica e visual, permitindo a quantificação experimental da meia-vida de cada tipo de dado (tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro), variando em função da probabilidade geométrica associada à face marcada.

Figura 9 – Imagem dos dados com a face marcada voltada para cima. Tetraedro, 4 lados, amarelo; hexaedro, 6 lados, Cinza; Octaedro, 8 lados, Branco; Dodecaedro, 12 lados, vermelho; e Icosaedro, 20 lados, verde.



Fonte: Autor.

Foi entregue para cada grupo de estudantes 80 dados de um dos tipos. Junto com os dados fornecemos também um recipiente para que os dados fossem colocados para serem lançados. Na figura 10 apresentamos os estudantes realizando a atividade.

Figura 10 – Estudantes realizando a atividade “dados Radioativos”



Fonte: Autor.

Para essa atividade também foi utilizado um roteiro experimental, juntamente com questões relacionadas aos assuntos e conceitos aplicados dentro da atividade. A seguir descrevemos o roteiro detalhadamente.

Roteiro experimento – Dados Radioativos

Situação problema: Imagine que você é um físico que foi contratado para fazer a manutenção de uma máquina de raio X e precisa fazer a reposição dos materiais radioativos da máquina, para isso você dispõe de dois isótopos, um com o tempo de meia vida curto, na casa dos minutos, e um com o tempo de meia vida mais longo, na casa dos meses. Contudo na hora de transportar esses elementos você percebeu que as etiquetas se descolaram do recipiente em que eles estavam guardados, e agora você precisa identificar cada um deles, e dispõe apenas de uma balança para pesar suas amostras em seu laboratório, como você poderia fazer a identificação das amostras?

1. Coloque todos os dados em um recipiente e os lance de uma vez sobre uma superfície (primeira rodada).
2. Conte e separe os dados cuja superfície marcada ficou para cima. Anote a quantidade de dados que decaíram.
3. Junte os dados que não decaíram no recipiente e os lances sobre a superfície novamente (está será considerada uma nova rodada).
4. Repita os passos 2 e 3 até completar 20 rodadas ou todos os dados decaírem. Faça isso para dois tipos de dados.

Dado A:

Rodada	dados que decaíram na rodada	Soma de dados que decaíram a cada rodada	Qtd. de dados que sobraram a cada rodada
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Dado B:

Rodada	dados que decaíram na rodada	Soma de dados que decaíram a cada rodada	Qtd. de dados que sobraram a cada rodada
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Fazer durante o Experimento

- I. O que os dados estão representando em um processo de decaimento?
- II. Ao fazer o experimento pela segunda vez, a quantidade de dados decaindo a cada rodada foi maior ou menor? E a quantidade de faces dos dados foi maior ou menor? Existe alguma relação entre os dados decaindo e a quantidade de faces do dado?

Depois do experimento

- I. Faça um gráfico da quantidade de dados que sobraram em cada rodada em função do número de rodadas para cada tipo de dado. Qual é o aspecto do gráfico?
- II. Qual é o tempo de meia vida em horas de cada tipo de dado? Considere que o intervalo de tempo entre cada rodada é de 1 hora. Descreva o pensamento que você utilizou para chegar nessa resposta.
- III. Por que o tempo de meia vida é diferente para cada tipo de dado? Tem alguma coisa haver com a probabilidade? Discuta
- IV. Supondo que os dados representam as amostras da situação problema, qual delas se desintegrariam mais rapidamente? Por que?
- V. Faça um pequeno texto descrevendo quais conceitos você utilizou na atividade, como ele foi representado e de que forma ela foi utilizada durante o experimento.

5º PASSO – Complexidade

Foram propostas novas situações-problema com um maior nível de complexidade. Os conceitos foram detalhadamente explicados, utilizando recortes de notícias sobre radioatividade como organizadores prévios. Este passo, teve como objetivo discutir a aplicabilidade dos conceitos de radioatividade. Para isso, foram utilizados recortes de notícias pertinentes.

Situação- problema³³: Ao abordarmos o tema da radioatividade, é comum que eventos históricos marcantes, como os acidentes de Chernobyl e o de Goiânia, sejam os primeiros a vir à mente. Nas Figuras 11 e 12, são apresentados recortes de notícias que tratam de diferentes aspectos relacionados à radioatividade. Faça a leitura das notícias e, com base nelas, responda às questões.

Figura 11 – Recorte da notícia “Chernobyl Brasileiro: Goiás teve um dos piores acidentes nucleares até hoje ”

Rescaldo do acidente

A limpeza da área afetada pelo acidente com o cézio-137 gerou 13,4 toneladas de resíduo radioativo que foram armazenadas em contêineres especiais, enterrados sob uma montanha artificial de terra e camadas de concreto e chumbo para evitar a propagação de radioatividade.

³³ Apresentamos uma parte das notícias trabalhadas, no apêndice 4 encontra a atividade completa.

A notícia menciona que o material radioativo foi enterrado sob concreto e chumbo. Por que você acha que isso deve ser feito e não ser enterrado apenas com terra de forma convencional? Explique

Figura 12 – Recorte da notícia “O que três itens radioativos desaparecidos nos últimos três meses têm em comum?”⁴

Quão perigosos são os itens radioativos perdidos?

Muito depende do tipo de isótopo radioativo dentro de um dispositivo e se ele está contido na blindagem ou aberto aos elementos.

O risco de exposição à radiação da câmera que desapareceu no Texas é “muito baixo”, especialmente porque o material radioativo é encapsulado por várias camadas de proteção, disseram autoridades.

Mas a cápsula na Austrália e o cilindro na Tailândia continham Césio-137, uma substância altamente radioativa que é potencialmente letal.

Especialistas alertam que o Césio-137 pode criar sérios problemas de saúde para as pessoas que entram em contato com ele: queimaduras na pele por exposição próxima, doenças causadas pela radiação e riscos potencialmente fatais de câncer, especialmente para aqueles expostos inconscientemente por longos períodos de tempo.

O Césio-137 tem uma meia-vida de cerca de 30 anos, o que significa que pode representar um risco para a população nas próximas décadas, se não for encontrado.

No recorte da notícia, o autor afirma que o Césio-137 pode representar um risco por várias décadas. Por que essa afirmação é feita? Explique

6º PASSO – Reconciliação Integrativa

Neste passo foi realizada a aplicação de um jogo de tabuleiro com perguntas e respostas relacionadas ao tema, que teve como objetivo a reconciliação integrativa dos conceitos estudados na unidade. Por fim, foi feita uma aula expositiva dialogada com o objetivo de concluir a unidade, retomando os conteúdos e integrando as atividades desenvolvidas durante a UEPS, buscando a reconciliação integrativa.

Jogo tabuleiro radioativo - O jogo de tabuleiro foi adaptado da proposta de Sales et al. (2020), incorporando um sistema de tabuleiro com cartas e perguntas que abordam os conceitos-chave da unidade. A dinâmica da partida exige que os jogadores respondam corretamente às perguntas para avançar no tabuleiro, transformando a revisão em uma experiência lúdica e competitiva. O jogo é descrito detalhadamente no apêndice 5. Na figura 13 apresentamos os estudantes durante a implementação da atividade.

Figura 13 – Estudantes jogando “Tabuleiro “Radioativo”

⁴ <https://www.cnnBrasil.com.br/internacional/o-que-tres-itens-radioativos-desaparecidos-nos-ultimos-tres-meses-tem-em-comum/>



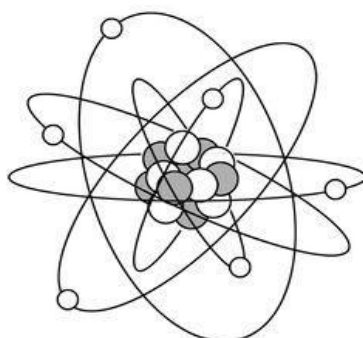
Fonte: Autor (2024).

Aula integradora final – Na aula posterior foi feita uma revisão da UEPS, através da apresentação de slides (Apêndice 6) numa aula expositiva dialogada, com o objetivo de rever os conceitos e relacioná-los, além de tirar dúvidas dos conceitos que tiveram maior dificuldade para desenvolver.

7º PASSO - Avaliação Somativa Individual

Foi proposta uma avaliação individual da aprendizagem. Nesta atividade, os estudantes responderam a questões abertas, expressando livremente sua compreensão sobre a radioatividade. Na sequência apresentamos a avaliação implementada.

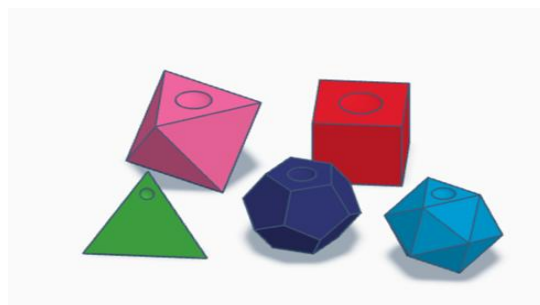
Questão 1. No passado, acreditava-se que tudo no universo era composto por terra, água, fogo e ar., No entanto, as perspectivas mudaram muito desde o século XXI. Hoje sabemos que a matéria é composta por átomos, além disso sabemos que existem partículas menores que o átomo, chamadas partículas subatômicas. Sabendo disso, preencha o átomo indicando suas partículas e explique quais os elementos que vão influenciar na carga, na massa e na instabilidade/estabilidade dos átomos conforme foi estudado.



Questão 2. Se alguém te perguntasse o que é um isótopo, o que você responderia? E qual a diferença para um radioisótopo? Descreva e/ou Ilustre seu pensamento.

Questão 3. Como você definiria radioatividade? Descreva e/ou Ilustre seu pensamento.

Questão 4. Durante o bimestre foi feita uma atividade prática com dados, que consistia em toda vez que um dado caísse com uma face pré definida para cima ele era retirado do jogo, ou seja, a cada rodada a quantidade de dados ia diminuindo, simulando o fenômeno de desintegração radioativa. Sabendo disso, como esse fenômeno acontece na natureza? Descreva e/ou Ilustre seu pensamento.



Questão 5. Outro processo estudado durante a unidade, foi o fenômeno de meia vida. Explique o que acontece durante esse processo, incluindo o que acontece com a massa ao decorrer do tempo. Descreva e/ou Ilustre seu pensamento.

Questão 6. A partir do conceito de emissões radioativas, escreva qual o número e massa atômica de cada novo elemento depois da partícula radioativa indicada.

- a) $U_{92}^{238} + \alpha \rightarrow Th$
- b) $Pa_{91}^{234} + \beta_- \rightarrow U$
- c) $Bi_{83}^{214} + \beta_+ \rightarrow Pb$
- d) $Rn_{86}^{222} + \alpha \rightarrow Po$

8º PASSO – Efetividade da UEPS

Conforme proposto por Moreira (2011), a avaliação da aprendizagem na UEPS foi concebida como um processo contínuo e formativo, integrado a todas as etapas da sequência didática. A verificação da efetividade de sua implementação ocorreu por meio da análise do desempenho dos estudantes, com foco na evolução progressiva de um campo conceitual da Radioatividade. Essa avaliação, de natureza qualitativa, baseou-se na identificação e interpretação dos esquemas e dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes na resolução das situações-problema, possibilitando a compreensão dos avanços na estruturação conceitual ao longo do desenvolvimento da unidade.

5. RESULTADOS

Considerando os referenciais de aprendizagem e os procedimentos metodológicos descritos nesta pesquisa, passaremos à análise dos resultados, com o objetivo de verificar se as metodologias e os recursos didáticos empregados na construção e implementação da UEPS contribuíram para um possível domínio do campo conceitual da radioatividade, pois para que o estudante tenha um domínio integral de um campo conceitual, de acordo com Vergnaud (1982), é necessário que este, se desenvolva ao longo de um longo período, por meio de experiência, maturidade e aprendizagem.

Dividimos a análise dos resultados em duas etapas. A primeira consiste na regra da ação, buscando uma relação de causa e efeito (Delgado, 2023; Vergnaud, 1990). Um exemplo é a relação entre o tempo de observação de um material radioativo e a quantidade de material restante, como no estudo da meia-vida. Podemos observar essa ideia na afirmação: "[...] observar quanto do material radioativo ainda resta após determinado tempo" – E9. Assim, concluímos que, se a quantidade de material radioativo diminui pela metade após certo intervalo de tempo (efeito), isso se deve à sua taxa constante de decaimento (causa). A partir dessa observação, formulamos o seguinte teorema-em-ação: A quantidade de material radioativo diminui de forma previsível ao longo do tempo, sendo reduzida pela metade a cada intervalo de meia-vida. Ou seja, quanto mais tempo passa, menor será a quantidade restante do material, seguindo uma relação exponencial.

Na segunda etapa da análise, buscamos identificar os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação mobilizados pelos estudantes, ou seja, os conceitos explícitos ou implícitos, que foram utilizados como esquemas para responder as questões. De acordo com Vergnaud (1990), os conceitos-em-ação correspondem aos elementos conceituais que o sujeito utiliza, muitas vezes de forma não verbalizada, para dar sentido às ações que realiza diante de uma situação-problema. Esses conceitos podem estar nomeados ou apenas subentendidos no discurso ou na ação.

No exemplo da meia-vida, por exemplo, os conceitos de decaimento radioativo, tempo de meia-vida são importantes para explicar o fenômeno observado, mesmo que nem todos sejam mencionados explicitamente. Uma formulação mais clara do raciocínio

do estudante poderia ser: “observar que a quantidade de material radioativo se reduz à metade a cada intervalo de tempo constante devido ao processo de decaimento nuclear”. Essa afirmação mostra que, ainda que o estudante não empregue todos os termos científicos de forma formal, ele demonstra compreender os conceitos e articula uma estrutura de pensamento coerente com os princípios da Física envolvidos.

De acordo com Schffler & Del Pino (2013), identificar os invariantes operatórios é importante para compreender como os estudantes constroem significados em contextos de aprendizagem, especialmente em áreas como a Física Moderna, onde os conceitos são abstratos e muitas vezes contraintuitivos.

Na seção 5.1, apresentamos uma análise qualitativa das atividades realizadas no passo 2 da UEPS, que teve como objetivo compreender os conhecimentos prévios dos estudantes sobre o tema da radioatividade. Para essa análise, organizamos a seção em duas subseções: a primeira dedicada aos conceitos relacionados à estrutura da matéria, e a segunda voltada aos conceitos de radioatividade. Salientamos que os resultados deste segundo passo, contribuiu para construção das diferentes situações aplicadas posteriormente ao longo da UEPS.

Na seção 5.2 apresentamos os resultados e análise obtidos da atividade desenvolvida no passo 5, que teve como objetivo discutir a aplicabilidade dos conceitos de radioatividade. Nessa atividade propomos novas situações-problema, com maior nível de complexidade utilizando recortes de notícias sobre radioatividade como organizadores prévios.

Na seção 5.3 mostramos os resultados e análise obtidos do passo 7 da UEPS, a avaliação somativa individual, onde os estudantes mostraram livremente sua compreensão sobre a radioatividade através de questões abertas.

5.1 ANÁLISE DO PASSO 2 – QUESTIONÁRIO DE CONHECIMENTOS PRÉVIOS

A subseção 5.1.1 trata da análise dos conhecimentos relacionados à estrutura da matéria, a partir da Situação Inicial 2 (Apêndice 3), aplicada durante o Passo 2 da UEPS. Essa atividade foi elaborada com base em conceitos fundamentais, como átomo, núcleo, prótons, nêutrons e elétrons, com o objetivo de analisar a base de entendimento que os estudantes tinham sobre estrutura da matéria, que mais adiante, iriam ajudar a compreender temas mais complexos, como os processos radioativos. A escolha desses

conteúdos não foi aleatória: eles funcionam como subsunçores, segundo a Teoria da Aprendizagem Significativa, que facilitam a assimilação de novos conhecimentos, conectando o que o estudante já sabe com o que está por vir.

A subseção 5.1.2 apresenta os conceitos de radioatividade a partir do olhar dos próprios estudantes. Para isso, propusemos inicialmente uma pergunta: “O que você pensa ou lembra quando ouve a palavra radioatividade?”. A ideia era abrir espaço para que os estudantes compartilhassem livremente suas impressões, lembranças, experiências e associações com o tema. As respostas trouxeram à tona desde elementos do senso comum até referências a contextos reais, como hospitais ou usinas nucleares. Para ampliar esse olhar, também utilizamos um recorte de notícia que relatava um episódio envolvendo material radioativo. Após a leitura, os estudantes foram convidados a responder a algumas questões que relacionavam o conteúdo da notícia com conceitos científicos, como decaimento, riscos à saúde e medidas de segurança. Esse recurso nos ajudou a observar como eles interpretavam situações do cotidiano à luz do conhecimento que já possuíam, mesmo que esse conhecimento ainda estivesse em formação.

5.1.1 Conhecimentos prévios relacionados à estrutura da matéria

Para a análise das respostas dos estudantes, como mencionado, adotamos a TCC, com o objetivo de identificar e interpretar os teoremas-em-ação e conceitos-em-ação mobilizados durante a realização da atividade. Essa abordagem nos permitiu compreender os esquemas, tanto explícitos quanto implícitos, que foram mobilizados diante das situações-problema propostas. No Quadro 9, apresentamos os possíveis conceitos-em-ação e teoremas-em-ação mobilizados nas produções dos estudantes relacionado ao conceito de átomo.

Quadro 8 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de átomo

Conceito-em-ação	Frequência n° de estudantes	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Átomo	7	<i>“Parte fundamental da matéria” – E12</i>	T ₁ - Átomo como parte fundamental da matéria
	4	<i>“Uma parte muito pequena” - E18</i>	
	8	<i>“É a menor parte da matéria” - E1</i>	
	3	<i>“Estrutura que possui várias camadas com cargas negativas e positivas, pois tem elétrons, nêutrons e prótons” - E2</i>	T ₂ - Átomo como estrutura composta por partículas

	3	Não responderam	-
--	---	-----------------	---

Para esse conceito foi possível identificar diferentes níveis de compreensão do conceito de átomo por parte dos estudantes, os quais se refletem nos conceitos-em-ação e teoremas-em-ação mobilizados durante a atividade.

As respostas foram agrupadas conforme suas semelhanças. O primeiro grupo, composto por sete estudantes, descreveu o átomo como a “parte fundamental da matéria”. Já um segundo grupo, formado por quatro estudantes, afirmou que o átomo é apenas “uma parte muito pequena”. Embora essas definições apresentem níveis distintos de precisão e profundidade, ambas indicam a presença de um mesmo Teorema-em-ação: “o átomo é a parte fundamental da matéria”. Do ponto de vista da Teoria dos Campos Conceituais, esse tipo de afirmação representa o que ele chama de invariante operatório, ou seja, uma ideia implícita, considerada verdadeira pelos estudantes, que orienta sua forma de pensar e agir diante de situações-problema. Nesse caso específico, o Conceito-em-ação está restrito à noção de que o átomo compõe a matéria, sem considerar, no entanto, aspectos estruturais mais complexos, como a presença de partículas subatômicas ou a organização interna do átomo.

A escolha de palavras como “parte” ou “muito pequena” evidencia que os estudantes mobilizam esquemas de pensamento relativamente simplificados. Esses esquemas parecem estar ligados a experiências escolares anteriores ou mesmo ao senso comum, sendo suficientes para responder a determinadas questões, mas ainda insuficientes para operar com conceitos científicos mais elaborados. Como aponta Mortimer (2000), é comum que estudantes apresentem uma compreensão fragmentada e essencialmente descritiva do átomo, muitas vezes marcada pela sua invisibilidade e por associações com ideias de tamanho reduzido ou invisibilidade ao olho nu.

Do ponto de vista pedagógico, esse tipo de concepção pode ser considerado um conhecimento prévio significativo, conforme proposto por Ausubel (2003), ou seja, uma ideia que já existe na estrutura cognitiva do estudante e que pode servir de base para a construção de conhecimentos mais complexos. No entanto, para que essa construção ocorra, é necessário que as situações de aprendizagem promovam a reestruturação dos esquemas utilizados e possibilitem ao estudante entrar em contato com diferentes formas de representação e de explicação do conceito, como gráficos, modelos atômicos, simulações e debates (Moreira, 2005).

Outo grupo formado por oito estudantes, definiu o átomo como “a menor parte da matéria”. Essa resposta revela a ativação de um conceito-em-ação relacionado à ideia de indivisibilidade da matéria. O teorema-em-ação presente pode ser formulado como: “o átomo é a menor parte possível da matéria”. Apesar de ser coerente do ponto de vista histórico, especialmente com o modelo de Dalton, esse teorema é cientificamente falso à luz do conhecimento atual (Santos, Mello e Catão, 2023) .

De acordo com a física, o átomo é uma estrutura divisível, formada por partículas subatômicas como elétrons, prótons e nêutrons, por isso, afirmar que o átomo é a menor parte da matéria é incorreto. Uma formulação mais precisa seria dizer que o átomo é a menor unidade que mantém as propriedades químicas de um elemento, o que tornaria a resposta conceitualmente adequada (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

A presença desse teorema-em-ação indica a ativação de um esquema cognitivo fundamentado em modelos simplificados que ainda são comuns de serem abordados na Educação Básica. Essa permanência se deve, em grande parte, à abordagem linear e descontextualizada com que os modelos atômicos costumam ser apresentados, o que acaba por reforçar concepções ultrapassadas entre os estudantes (Bignardi & Gibin, 2021).

Segundo Vergnaud (1990), os teoremas-em-ação orientam a resolução de problemas e, embora possam estar incorretos, funcionam como invariantes operatórios. No entanto, para que ocorra aprendizagem significativa, é essencial que esses teoremas sejam confrontados e reconstruídos por meio de intervenções pedagógicas planejadas (Moreira & Greca, 2002).

Um terceiro grupo, com três estudantes, apresentou uma formulação conceitual mais articulada ao descrever o átomo como uma “estrutura que possui várias camadas com cargas negativas e positivas, pois tem elétrons, nêutrons e prótons” (E2). Essa resposta evidencia a apropriação de elementos fundamentais da estrutura atômica, especialmente aqueles relacionados ao modelo proposto por Rutherford em 1911. Observamos a mobilização de conceitos sobre a organização interna do átomo, incluindo prótons, nêutrons e elétrons, suas respectivas cargas elétricas e a disposição dos elétrons em camadas, conforme descrito por Atkins, Jones e Laverman (2018).

Esses estudantes demonstram aproximação com os modelos teóricos da física moderna, que superam a concepção indivisível do átomo proposta por Demócrito na Antiguidade. Além disso, baseiam-se em evidências experimentais, como as obtidas no experimento de dispersão de partículas alfa, conduzido por Rutherford (1911), e nos

modelos quantizados de Bohr, que em 1913 introduziu a ideia de níveis de energia para os elétrons em torno do núcleo (Bohr, 1913). Nesse contexto, o teorema-em-ação identificado, de que o átomo é uma estrutura composta por partículas com cargas distintas organizadas em camadas, é considerado conceitualmente verdadeiro, por estar alinhado aos modelos aceitos.

O próximo conceito que foi solicitado foi o de núcleo atômico, no quadro 9 apresentamos a classificação dos invariantes operatórios iniciais mobilizados pelos estudantes.

Quadro 9 - Análise dos invariantes operatórios para o conceito de núcleo atômico

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Núcleo atômico	7 estudantes	<i>“Onde estão localizados os prótons e nêutrons” - E1</i>	T ₁ - Região do átomo onde se localiza os prótons e nêutrons
	11 estudantes	<i>“Parte central do átomo” - E12</i>	T ₂ - O núcleo está na região central do átomo
	3 estudantes	<i>“Onde se concentra 99% da massa do átomo” - E15</i>	Região onde se concentra a massa do átomo
	2 estudantes	<i>“Onde estão localizados os prótons e nêutrons, o núcleo tem 99% da massa do átomo” - E8</i>	T ₃ - Região onde se concentra a maior parte da massa do átomo T ₄ - Região do átomo onde se localiza os prótons e nêutrons
	2 estudantes	Não responderam	

Na análise dos esquemas para descrever o que eles entendem por núcleo atômico sete estudantes afirmaram que o núcleo atômico é “onde estão localizados os prótons e nêutrons”. Essa resposta revela a ativação de um teorema-em-ação formulado como: “O núcleo é a região do átomo onde se localizam os prótons e nêutrons”. O Conceito-em-ação presente nessa afirmação está centrado na ideia de que o núcleo atômico é composto por partículas massivas, ou seja, prótons (com carga positiva) e nêutrons (sem carga), o que confere a ele a maior parte da massa do átomo.

Tais invariantes operatórios são cientificamente corretos e demonstram uma aproximação consistente com o campo conceitual da estrutura atômica. Embora a resposta seja predominantemente descritiva, ela está alinhada ao modelo nuclear do átomo proposto por Rutherford (1911), no qual o núcleo é identificado como uma região densa e central, ao redor da qual orbitam os elétrons. A presença simultânea de prótons e nêutrons no núcleo também está de acordo com o modelo atual (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

Outro grupo, composto por 11 estudantes, descreveu o núcleo como a “parte central do átomo”, revelando um conceito-em-ação vinculado à sua posição espacial. O teorema-em-ação, “O núcleo é a região central do átomo” é cientificamente verdadeiro, mas apresenta uma visão superficial, pois não considera a composição (prótons e nêutrons) nem a função do núcleo. Esse tipo de resposta indica um esquema cognitivo inicial, ainda centrado na localização, e que pode ser ampliado com atividades que explorem aspectos estruturais e funcionais do núcleo (Papageorgiou, Markos e Zarkadis, 2016).

Um terceiro conjunto de estudantes, formado por três estudantes, destacou o núcleo como “onde se concentra 99% da massa do átomo”. Aqui, o teorema-em-ação pode ser formulado como: “O núcleo é a região onde se concentra a massa do átomo”. Esse teorema é considerado verdadeiro, visto que o núcleo realmente é responsável por praticamente toda a massa do átomo, além disso, isso indica um avanço em relação à compreensão da distribuição da massa no átomo, mesmo que o dado apresentado seja mais quantitativo do que explicativo.

Por fim, dois estudantes apresentaram uma resposta mais articulada, afirmando que o núcleo é a região “onde estão localizados os prótons e nêutrons, e onde se concentra 99% da massa do átomo” (E15). Essa formulação mobiliza simultaneamente dois conceitos em ação: a composição nuclear (presença de prótons e nêutrons) e a distribuição da massa. Dessa forma, são ativados dois teoremas-em-ação: “O núcleo é a região onde se localizam os prótons e nêutrons” e “O núcleo é onde se concentra a maior parte da massa do átomo”.

Do ponto de vista científico, esses teoremas podem ser considerados conceitualmente corretos em um modelo simplificado, frequentemente utilizado no ensino básico. No entanto, é importante destacar que o núcleo não é composto exclusivamente por prótons e nêutrons; há também outras partículas nucleares (como glúons e quarks), ainda que essas não sejam comumente exploradas nos níveis iniciais de ensino (Barracco, 2019). A resposta dos estudantes sugere que eles trabalharam com modelos nucleares clássicos, como o de Rutherford e o de Bohr, que são úteis para introdução conceitual, mas não abrangem a complexidade subnuclear.

Em relação à massa, está cientificamente correta que mais de 99% da massa do átomo está concentrada no núcleo, visto que prótons e nêutrons possuem massas significativamente maiores que os elétrons. Esse dado é frequentemente apresentado

como um fato fundamental na Física e Química, contribuindo para discussões sobre estabilidade atômica, radioatividade e reações nucleares (Dorsch e Guio, 2023).

Em síntese, os resultados mostram que os estudantes possuem um conhecimento introdutório sobre o núcleo atômico, reconhecendo seus principais componentes e localização, mas ainda não mobilizam explicações mais profundas ou funcionais sobre seu papel na estrutura da matéria. Os invariantes operatórios subjacentes às respostas revelam uma compreensão descritiva e compartimentalizada, focada na identificação de elementos e na localização espacial, sem articulação com processos físicos associados ao núcleo, como radioatividade, estabilidade ou forças internas.

O próximo conceito que solicitado foi o de eletrosfera, no quadro 10 apresentamos os invariantes operatórios iniciais mobilizados pelos estudantes.

Quadro 10 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de eletrosfera

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Eletrosfera	15 estudantes	<i>“Área em volta do núcleo” - E14</i>	T ₁ - Eletrosfera como uma região do átomo
	1 estudante	<i>“Círculo em volta do átomo” - E12</i>	
	3 estudantes	<i>“Onde é cheio de elétrons” - E7</i>	T ₂ - Eletrosfera como uma região onde ficam os elétrons
	5 estudantes	<i>“Área em volta do núcleo, onde estão os elétrons” - E1</i>	T ₁ - Eletrosfera como uma região do átomo T ₂ - Eletrosfera como uma região onde ficam os elétrons
	1 estudante	Não responderam	

Em todos os grupos, os invariantes operatórios mobilizados acerca da eletrosfera apresentam-se em um estágio ainda incipiente, marcado por esquemas descritivos básicos. Tais invariantes, compreendidos, conforme Vergnaud (1990), como estruturas cognitivas que orientam o sujeito na resolução de situações conceituais, limitaram-se, em sua maioria, à localização espacial da eletrosfera, expressa em afirmações como “área em volta do núcleo” (E14) ou “Onde está cheio de elétrons” (E7). A ausência de articulações entre a eletrosfera e conceitos fundamentais, como número de elétrons na camada de valência, reatividade e formação de ligações químicas, evidencia um campo conceitual restrito e fragmentado. Essa limitação compromete a mobilização de invariantes operatórios mais próximos do conhecimento científico, refletindo

dificuldades na apropriação integrada da estrutura atômica (Silva Junior & Costa, 2024).

No quadro 11 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de próton.

Quadro 11 - Análise dos invariantes operatórios para o conceito de próton

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Próton	19 estudantes	<i>“Carga positiva” -E2</i>	Próton como um tipo de carga
	3 estudantes	<i>“O que tem dentro do núcleo” - E5</i>	Próton como um constituinte do núcleo
	1 estudante	<i>“Tem carga positiva e define o elemento” – E1</i>	Próton como um tipo de carga Próton como responsável por determinar a identidade de um elemento químico
	2 estudantes	Não responderam	-

Para esse conceito, a maioria dos estudantes, 19 ao todo, descreveu o próton apenas como sendo uma “carga positiva”. Essa resposta revela a ativação de um conceito-em-ação focado exclusivamente na característica elétrica da partícula, e está associada a um teorema-em-ação do tipo: “O próton é um tipo de carga”. Embora essa afirmação seja, do ponto de vista físico, correta, ela expressa uma compreensão restrita, que reduz o próton a uma propriedade isolada, sem considerar seu papel mais amplo na estrutura do átomo ou em suas implicações químicas. Esse tipo de visão restrita é comum entre estudantes nos anos finais do ensino fundamental e médio, e tende a emergir quando os conceitos são apresentados de forma descontextualizada ou excessivamente simplificada (Silva, 2019d)

Um segundo grupo, formado por três estudantes, respondeu que o próton é “o que tem dentro do núcleo”. Nesse caso, há um deslocamento da atenção da carga elétrica para a localização estrutural da partícula. O conceito-em-ação mobilizado está centrado na ideia de que o próton integra a composição do núcleo, e o teorema-em-ação correspondente pode ser formulado como: “O próton é um constituinte do núcleo atômico”. Essa resposta, ainda que superficial, representa um avanço em relação ao grupo anterior, pois reconhece o papel do próton dentro da arquitetura interna do átomo,

mesmo sem aprofundar suas funções na estabilidade nuclear ou nas interações com outras partículas subatômicas.

Por fim, apenas um estudante apresentou uma resposta que demonstra um campo conceitual mais consolidado, afirmando que o próton “tem carga positiva e define o elemento”. Essa formulação articula dois conceitos em ação relevantes: a carga elétrica e a função do próton na identidade química dos elementos. O Teorema-em-ação associado pode ser enunciado como: “O próton é responsável por determinar a identidade de um elemento químico”. Trata-se de uma formulação conceitualmente correta e coerente com o conhecimento científico atual, uma vez que o número de prótons, ou número atômico, é o critério adotado para classificar os elementos na tabela periódica. Segundo Dorsch e Guio (2023), o número de prótons é o que define a identidade de um elemento químico, sendo esse o princípio fundamental que orienta a organização da tabela periódica. Essa resposta evidencia que o estudante foi capaz de integrar diferentes aspectos do conceito, relacionando estrutura subatômica, propriedades químicas e representação simbólica dos elementos, o qual sinaliza um avanço importante na construção do campo conceitual da estrutura da matéria.

No quadro 12 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de nêutron.

Quadro 12 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de nêutron

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Nêutron	14 estudantes	<i>“Carga neutra” - E1</i>	Nêutron como um tipo de carga
	2 estudantes	<i>“Não tem carga, é neutro” - E11</i>	
	4 estudantes	<i>“Parte do átomo neutro” - E12</i>	Nêutron como um tipo de carga
	3 estudantes	<i>“Parte neutra dentro do núcleo” - E5</i>	
	2 estudantes	Não responderam	-

Para este conceito, 14 estudantes apresentaram definições que identificam o nêutron exclusivamente como uma “carga neutra”. Tal formulação denota a mobilização de um teorema-em-ação simplificado de acordo com Vergnaud (1990). Embora essa construção demonstre o reconhecimento de uma das propriedades fundamentais do nêutron, ou seja, a neutralidade elétrica, ela permanece restrita a uma abordagem descritiva, sem articulação com o papel estrutural e funcional dessa partícula no contexto do núcleo atômico. Outros dois estudantes ofereceram formulações

semelhantes, como “não tem carga, é neutro”, reforçando o foco exclusivo na propriedade elétrica. Tais respostas revelam invariantes operatórios estáveis, porém limitados, que ainda não se expandem para uma compreensão mais completa do átomo.

Quatro estudantes deram respostas como “parte do átomo neutro”, o que mostra uma tentativa de relacionar o nêutron com a estrutura do átomo como um todo. Ainda que a formulação não seja completamente precisa, ela revela um movimento em direção a uma visão mais integrada. Da mesma forma, outros três estudantes disseram que o nêutron é a “parte neutra dentro do núcleo”. Esse tipo de resposta sugere que esses estudantes começam a perceber o nêutron não apenas como um tipo de carga, mas como uma parte do núcleo atômico, o que é um avanço no campo conceitual.

Em geral, observamos que a maior parte dos estudantes ainda compreende o nêutron de forma bastante superficial, focando apenas em sua carga elétrica. O invariante operatório predominante nessas respostas está centrado na identificação do nêutron como “nem positivo, nem negativo”, sem considerar seu papel na estabilidade nuclear ou em processos como a fissão ou o decaimento beta, por exemplo (Halliday; Resnick; Walker, 2023). Segundo Vergnaud (1998), os estudantes ativam esquemas cognitivos que envolvem representações simplificadas ou parcialmente apropriadas dos conceitos científicos. No caso do nêutron, muitos estudantes acionam invariantes operatórios que se restringem a aspectos pontuais, como sua neutralidade elétrica. Em outros casos, há tentativas de ampliar essa compreensão ao mencionar a localização do nêutron no núcleo. No entanto, os esquemas mobilizados ainda se mostram insuficientes para que se compreenda o papel funcional e estrutural do nêutron dentro do átomo, especialmente em relação à estabilidade nuclear e às transformações nucleares. Por fim, os dois estudantes que não responderam à questão sugerem dificuldades em ativar qualquer esquema ou representação conceitual, o que pode indicar ausência de subsunçores relevantes ou baixa familiaridade com o conteúdo.

No quadro 13 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de elétron.

Quadro 13 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de elétron

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Elétron	21 estudantes	“Tem carga negativa” - E1	Elétron como um tipo de carga
	1 estudante	“Parte negativa do átomo” - E15	

	1 estudante	<i>“Uma coisa que gera eletricidade” - E13</i>	Elétron como geradora de eletricidade
	2 estudantes	Não responderam	-

Quando questionados sobre o conceito de elétron, a grande maioria dos estudantes afirmou que o elétron “tem carga negativa”. Essa resposta revela a ativação de um teorema-em-ação centrado exclusivamente na carga elétrica da partícula, sugerindo que, para esses estudantes, essa é a principal e, muitas vezes, única característica relevante do elétron. Embora esse dado esteja de acordo com o conhecimento científico, ele representa uma visão reduzida, que não contempla aspectos importantes como a função do elétron na formação de átomos, nas ligações químicas ou em processos de condução elétrica. Segundo Vieira et al. (2021), muitos estudantes tendem a associar partículas subatômicas apenas às suas propriedades imediatas e visíveis, como carga elétrica.

Outro estudante descreveu o elétron como “a parte negativa do átomo”. Embora mais subjetiva, essa formulação ativa o mesmo conceito-em-ação limitado à polaridade elétrica, indicando que o conhecimento se restringe à ideia da carga negativa, sem articulação com os demais componentes da estrutura atômica. Conforme apontado por Moreira (2011), esse tipo de concepção descritiva é comum quando o ensino enfatiza definições isoladas em vez de relações conceituais mais amplas.

Uma resposta em particular se destacou pela tentativa de atribuir uma função prática ao elétron: “uma coisa que gera eletricidade”. Embora conceitualmente imprecisa, essa afirmação ativa um teorema-em-ação funcional, associando o elétron a fenômenos observáveis, como o fluxo de corrente elétrica. Essa tentativa de contextualização, mesmo que incipiente, é relevante, pois demonstra que o estudante tenta conectar o conceito a algo concreto.

No conjunto, as respostas indicam que os estudantes já possuem certa familiaridade com o conceito de elétron, mas que essa familiaridade permanece centrada quase exclusivamente em sua carga negativa, com pouca compreensão sobre seu papel na estrutura do átomo ou em processos físicos e químicos mais complexos. Os invariantes operatórios predominantes revelam um entendimento ainda descritivo e pontual.

No quadro 14 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de massa atômica.

Quadro 14 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de massa atômica.

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Massa atômica	8 estudantes	<i>“A massa de um átomo”</i>	T ₁ - Massa atômica como massa de um único átomo.
	7 estudantes	<i>“O quanto um átomo pesa”</i> - E12	T ₂ - Massa atômica como a soma das partículas do núcleo.
	1 estudante	<i>“Peso do próton e nêutron”</i> - E18	
	1 estudante	<i>“É a soma do número de prótons e nêutrons”</i> - E1	
	5 estudantes	<i>“Média da massa de todos os núcleos de um elemento”</i> - E2	T ₃ - Massa atômica como a média ponderada dos isótopos de um elemento.
	3 estudantes	Não responderam	-

Na análise dos invariantes operatórios para o conceito de massa atômica, oito estudantes responderam com frases como “a massa de um átomo”. Outros sete disseram “o quanto um átomo pesa”. Essas formulações ativam o que chamaremos de teorema-em-ação T1: massa atômica como a massa de um único átomo. Esse teorema é falso, pois a massa atômica não corresponde à massa de um único átomo isolado, mas sim à média ponderada das massas dos isótopos naturais de um elemento, levando em conta suas abundâncias relativas. A massa atômica indicada na tabela periódica é uma média ponderada das massas dos isótopos naturais do elemento, refletindo as proporções em que eles ocorrem (Atkins, Jones e Laverman, 2018). Para que esse teorema fosse considerado correto, a resposta dos estudantes precisaria incluir a ideia de variação isotópica e média ponderada, que são centrais para a definição científica do conceito.

Um estudante afirmou que a massa atômica é o “peso do próton e do nêutron”, e outro respondeu que é “a soma do número de prótons e nêutrons”. Essas respostas refletem o teorema-em-ação T2: massa atômica como a soma das partículas do núcleo. Esse teorema é falso, pois confunde número de massa (A) com massa atômica real. Embora prótons e nêutrons sejam, de fato, as principais responsáveis pela massa do átomo, dado que os elétrons têm massa desprezível, a massa atômica não é uma simples soma inteira dessas partículas. Ela é um valor decimal, porque leva em conta a massa real de cada isótopo e sua proporção de ocorrência. Para Atkins, Jones e Laverman, (2018), a massa atômica de um elemento é a média ponderada das massas de seus isótopos naturais, com base na abundância relativa de cada isótopo. Para que esse teorema fosse verdadeiro, os estudantes precisariam indicar que estão falando da média ponderada de massas reais, e não de um valor obtido por contagem de partículas.

Por outro lado, cinco estudantes apresentaram uma resposta mais próxima do conceito científico, afirmando que a massa atômica é a “média da massa de todos os núcleos de um elemento”. Essa formulação ativa o teorema-em-ação T3: massa atômica como a média ponderada das massas dos isótopos de um elemento. Esse teorema é verdadeiro, embora a expressão “massa dos núcleos” possa ser refinada para deixar claro que a média é feita a partir da massa dos átomos como um todo — que, embora concentrada no núcleo, também inclui pequenas contribuições dos elétrons. Ainda assim, a formulação demonstra um entendimento conceitualmente adequado e está de acordo com a definição apresentada por Atkins, Jones e Laverman, (2018), que falam que a massa atômica é a média ponderada das massas dos isótopos de um elemento, levando em conta suas abundâncias relativas na natureza. Portanto, essa resposta indica que esses estudantes já operam com um campo conceitual mais consolidado, próximo ao saber científico escolarmente valorizado.

Em resumo, a análise dos esquemas demonstra que os estudantes apresentam campos conceituais em diferentes níveis de aproximação com o conceito de massa atômica. A maior parte ainda interpreta o termo de forma simplificada, como se fosse o peso de um único átomo ou a simples soma dos prótons e nêutrons. Essas ideias, embora incorretas do ponto de vista científico, apresentam tentativas de compreender a estrutura atômica e podem servir como ponto de partida para atividades que levem os estudantes a mobilizar teoremas-em-ação corretos, como o representado por T3.

No quadro 15 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de número atômico.

Quadro 15 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de número atômico

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Número atômico	18 estudantes	<i>“Número de prótons do átomo” - E1</i>	T ₁ - Número atômico como quantidade de prótons de um átomo
	4 estudantes	<i>“É o número de cargas positivas dentro do núcleo do átomo” - E14</i>	T ₂ - Número atômico como carga
	1 estudante	<i>“Número de cargas do átomo” - E12</i>	
	1 estudante	<i>“O número que indica a qual família ele pertence” - E6</i>	T ₃ - número atômico como posição do elemento na tabela periódica
	1 estudante	Não responderam	-

No que diz respeito ao conceito de número atômico, a grande maioria dos estudantes afirmou corretamente que ele representa o “número de prótons do átomo”. Essa formulação revela o teorema-em-ação T1: “Número atômico como quantidade de prótons de um átomo”. Esse teorema é verdadeiro, pois está em total conformidade com a definição científica de número atômico. Segundo Atkins, Jones e Laverman, (2018), o número atômico (Z) é definido como o número de prótons no núcleo de um átomo, sendo essa a identidade fundamental de um elemento químico. Essa compreensão, portanto, indica que esses estudantes ativaram um invariante operatório adequado, de acordo com o campo conceitual (Vergnaud, 1993).

Um segundo grupo, composto por quatro estudantes, declarou que o número atômico é “o número de cargas positivas dentro do núcleo do átomo”. Essa formulação ativa o teorema-em-ação T2: “Número atômico como carga”. Embora esse teorema não seja completamente falso, ele está conceitualmente impreciso. Isso porque, ao empregar o termo “cargas positivas”, os estudantes até sinalizam a presença dos prótons, mas generalizam a noção de carga, o que pode confundir o conceito de número atômico com o de carga elétrica total, que depende também dos elétrons. Como explicam Atkins, Jones e Laverman, (2018), embora os prótons tenham carga positiva, o número atômico não expressa carga, mas quantidade. Para que esse teorema fosse considerado verdadeiro, seria necessário especificar que o número atômico se refere ao número de prótons e não à carga total do átomo, que pode variar no caso de íons.

Um terceiro estudante reforçou o mesmo teorema ao afirmar que o número atômico é o “número de cargas do átomo”. Neste caso, o entendimento é falso, pois o termo “cargas” é usado de forma genérica, sem distinção entre prótons e elétrons. Isso compromete a clareza conceitual, podendo gerar equívocos na compreensão da neutralidade elétrica e da formação de íons. Como destaca Halliday, Resnick e Walker, (2023), em um átomo neutro, o número de prótons é igual ao número de elétrons, mas essa igualdade é uma condição de equilíbrio eletrostático, não uma definição do número atômico. Assim, a formulação correta exigiria que o estudante especificasse apenas os prótons como referência para o número atômico.

Por fim, um estudante respondeu que o número atômico é “o número que indica a qual família ele pertence”. Essa afirmação ativa o teorema-em-ação T3: “Número atômico como posição do elemento na tabela periódica”. Esse teorema é impreciso, embora contenha um ponto parcialmente correto. De fato, os elementos são organizados na tabela periódica em ordem crescente de número atômico, o que permite a associação

entre Z e a posição do elemento (Atkins, Jones e Laverman, 2018). No entanto, o número atômico não determina diretamente a qual família um elemento pertence. A família, ou grupo, depende da configuração eletrônica, especialmente da distribuição dos elétrons na camada de valência. Como explica Ausubel (2003), para que a aprendizagem de conceitos ocorra de forma significativa, é necessário que o estudante relacione o novo conhecimento com estruturas cognitivas previamente organizadas, e, neste caso, o conhecimento sobre famílias exige a articulação com o conceito de níveis e subníveis eletrônicos, não apenas com o número de prótons.

De forma geral, a maioria dos estudantes demonstram uma boa compreensão do conceito, reconhecendo corretamente que o número atômico está relacionado à quantidade de prótons no núcleo. No entanto, ainda aparecem respostas que sugerem confusão entre carga, número de partículas e posição na tabela periódica. Esses dados mostram que o invariante operatório predominante está próximo de ser adequado, mas que a linguagem precisa e a distinção entre conceitos próximos, como número atômico, carga elétrica e número de massa.

No quadro 16 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de carga.

Quadro 16 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de carga

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Carga	1 estudante	<i>“Energia” -E18</i>	Carga como uma forma de energia
	16 estudantes	<i>“São as cargas positiva e negativa” - E1</i>	Carga como polaridade (positiva ou negativa)
	4 estudantes	<i>“Prótons e elétrons influenciam nela”</i>	Carga como dependente das partículas subatômicas
	1 estudante	<i>“É a quantidade de prótons e elétrons que indica se a carga é positiva ou negativa” - E6</i>	
	1 estudante	<i>“É uma propriedade das partículas elementares que compõem o átomo” - E4</i>	Carga como uma propriedade da matéria
	2 estudantes	Não responderam	-

Ao serem questionados sobre o conceito de carga elétrica, 16 estudantes mencionaram que carga se refere às “cargas positiva e negativa”. Essa formulação ativa o teorema-em-ação que compreende a carga como polaridade elétrica, ou seja, a propriedade que determina se uma partícula possui carga positiva ou negativa. Esse teorema é verdadeiro e bastante comum em fases iniciais da aprendizagem, pois

corresponde à descrição clássica da carga elétrica. De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2023), na natureza existem dois tipos de carga elétrica: a positiva e a negativa. As interações entre essas cargas seguem a regra segundo a qual cargas opostas se atraem e cargas de mesmo tipo se repelem. No entanto, essa visão, embora correta, ainda é descritiva e superficial, pois os estudantes identificam os sinais das cargas, mas nem sempre compreendem como elas se originam, se distribuem ou quais efeitos provocam nos sistemas físicos.

Quatro estudantes demonstraram um avanço ao falar que “prótons e elétrons influenciam na carga”. Essa resposta ativa o teorema-em-ação de que a carga de um corpo depende da quantidade de partículas subatômicas com cargas opostas. Esse teorema é conceitualmente correto e representa um passo importante na construção de significados mais estruturados. Como afirma Vergnaud (1990), os invariantes operatórios mobilizados nesse tipo de formulação revelam esquemas que começam a articular relações causais entre partículas e propriedades macroscópicas, no caso, a carga resultante.

Um outro estudante afirmou que a carga é “a quantidade de prótons e elétrons que indica se a carga é positiva ou negativa”. Aqui temos um teorema-em-ação mais robusto, que incorpora corretamente a ideia de carga líquida, resultante do desequilíbrio entre prótons (positivos) e elétrons (negativos). Essa concepção é importante para compreender, por exemplo, a formação de íons e a eletrização por atrito ou indução. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2023), a carga líquida de um corpo é determinada pela diferença entre as cargas positivas e negativas presentes, o que reforça a adequação da resposta apresentada.

Outro estudante apresentou uma definição ainda mais avançada, ao dizer que a carga é “uma propriedade das partículas elementares que compõem o átomo”. Esse enunciado ativa o teorema-em-ação de que a carga é uma propriedade intrínseca da matéria, o que é verdadeiro e conceitualmente avançado. Essa visão se aproxima de uma concepção científica mais refinada, na qual a carga é entendida como uma característica fundamental de partículas como o próton e o elétron, não sendo criada ou destruída, mas apenas transferida ou redistribuída. Esse tipo de formulação indica que o estudante está em um nível mais elaborado do campo conceitual da eletrostática (Vergnaud, 1990; Ausubel, 2003).

Por outro lado, um estudante afirmou que carga é “energia”, ativando um teorema-em-ação incorreto. A ideia de que carga elétrica seria uma forma de energia é

conceitualmente falsa, embora essa confusão seja recorrente entre estudantes. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2023), carga elétrica é uma propriedade das partículas; a energia elétrica, por sua vez, é uma forma de energia associada ao movimento ou à interação entre essas cargas. Confundir esses conceitos compromete a compreensão de fenômenos como corrente elétrica, potência e conservação de energia.

Em síntese, os dados revelam que os estudantes mobilizam invariantes operatórios com diferentes níveis de complexidade. A maioria compreende corretamente a existência de dois tipos de carga, e parte deles já começa a associar essas cargas às partículas subatômicas. Alguns, inclusive, demonstram uma compreensão mais abstrata do conceito, ao considerarem a carga como uma propriedade fundamental da matéria.

No quadro 17 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de isótopo.

Quadro 17 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de isótopo

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
isótopo	8 estudantes	<i>“Átomos do mesmo elemento, porém com números de nêutrons diferentes”</i> - E2	Isótopo com variantes de um elemento
	1 estudante	<i>“Átomos do mesmo elemento, porém com números de elétrons diferentes”</i> - E4	
	3 estudantes	<i>“A carga neutra influencia”</i> - E11	Indeferido
	2 estudantes	<i>“Conjunto de átomos que tem diferentes números de massa e mesmo número atômico”</i> - E14	Isótopos como átomos com massas distintas, mas mesmo número atômico
	11 estudantes	Não responderam	-

Para o conceito os isótopos, oito estudantes afirmam que são “átomos do mesmo elemento, porém com números de nêutrons diferentes”. Essa formulação revela um teorema-em-ação verdadeiro, que compreende os isótopos como variações de um mesmo elemento químico, mantendo o número de prótons constante, mas com diferentes números de nêutrons. Essa concepção está em plena conformidade com a definição científica apresentada por Atkins, Jones e Laverman, (2018), que destacam que isótopos são átomos de um mesmo elemento (mesmo número atômico) que diferem em número de nêutrons, e portanto, possuem massas atômicas diferentes. A ativação desse teorema sugere que esses estudantes já internalizaram um invariante operatório adequado, operando com um campo conceitual consistente sobre estrutura atômica.

Por outro lado, um estudante declarou que os isótopos seriam “átomos do mesmo elemento, porém com números de elétrons diferentes”. Aqui, o teorema-em-ação ativado é falso, pois descreve, na verdade, a formação de íons, não de isótopos. Essa resposta revela um caso clássico de superposição de conceitos, quando o estudante mobiliza representações de diferentes campos conceituais de forma inadequada. Essa dificuldade é típica de estudantes que ainda não estabeleceram distinções claras entre conceitos relacionados à carga elétrica (íons) e à massa atômica (isótopos). Como aponta Vergnaud (1998), os erros conceituais não são apenas ausência de conhecimento, mas sim produtos de esquemas operatórios incompletos ou mal ajustados ao conceito em questão.

Três estudantes deram respostas vagas como “a carga neutra influencia”, que dificultam a identificação de um conceito-em-ação claramente definido. A resposta parece apontar para uma associação entre neutralidade elétrica e estrutura atômica, mas a ambiguidade torna o teorema-em-ação indefinido ou indeferido. Pode-se supor que o estudante tentou relacionar o nêutron com a neutralidade do átomo, ou confundiu carga elétrica com massa nuclear. Esse tipo de formulação imprecisa indica que o estudante ainda opera com esquemas simplificados, que necessitam ser desenvolvidos com mediação pedagógica adequada (Moreira, 2011).

Dois estudantes apresentaram uma definição mais elaborada: “conjunto de átomos que têm diferentes números de massa e mesmo número atômico”. Essa formulação ativa um teorema-em-ação verdadeiro, demonstrando que os estudantes conseguiram articular conceitos-chave, como número atômico (Z) e número de massa (A). Mesmo com uma linguagem mais técnica, a estrutura da resposta revela que esses estudantes acessaram um campo conceitual mais estruturado, que permite compreender com mais clareza as propriedades nucleares dos elementos químicos.

Por fim, chama atenção o fato de que 11 estudantes não responderam à questão, um número relativamente alto em comparação aos outros conceitos. Isso pode indicar que o conceito de isótopo ainda é pouco familiar para uma parte significativa da turma, ou que sua abordagem em sala ainda não foi suficiente para gerar uma representação significativa para esses estudantes.

Em resumo, a análise mostra que parte dos estudantes compreende corretamente que os isótopos se distinguem pelo número de nêutrons e, consequentemente, pela massa, embora pertençam ao mesmo elemento químico. Contudo, também foram observadas respostas que revelam confusões com outros conceitos, como íons ou carga,

além de um grande número de estudantes que não responderam. Os invariantes operatórios mais adequados aparecem nos grupos que associam isótopo à variação na massa atômica mantendo o número atômico constante.

No quadro 18 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de Átomo Estável/Instável.

Quadro 18 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de Átomo Estável/Instável

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Átomo Estável/Instável	4 estudantes	<i>“Átomo regular ou irregular” - E12</i>	Indeferido
	14 estudantes	<i>“Quando o número de prótons e nêutrons é diferente é instável e igual é estável” – E2</i>	Se o número de prótons e nêutrons for igual, o átomo será estável; caso contrário, será instável
	2 estudantes	<i>“A proporção do número de nêutrons e prótons dentro do núcleo vai dizer se ele é instável ou estável” - E14</i>	Se a proporção entre nêutrons e prótons estiver equilibrada, o átomo será estável; caso contrário, será instável
	5 estudantes	Não responderam	-

Nos esquemas elaborados para o para o conceito de Átomo Estável/Instável, 14 estudantes afirmaram que “quando o número de prótons e nêutrons é igual, o átomo é estável; quando é diferente, ele é instável”. Esse enunciado ativa o teorema-em-ação T1: “Se o número de prótons e nêutrons for igual, o átomo será estável; caso contrário, será instável”. Esse teorema é falso, embora expresse uma tentativa válida de compreensão do conceito de estabilidade nuclear. Essa associação simplificada é verdadeira apenas para alguns elementos leves como o hélio, o carbono e o oxigênio, nos quais a proporção 1:1 (prótons = nêutrons) efetivamente se relaciona com estabilidade. Porém, à medida que o número atômico aumenta, essa proporção ideal muda: é necessário um número maior de nêutrons do que de prótons para garantir a estabilidade do núcleo, devido à crescente repulsão eletrostática entre os prótons (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

Essa resposta revela um conceito-em-ação inicial, mas que pode ser trabalhado, onde os estudantes já percebem que a estabilidade está associada a uma relação entre as partículas nucleares, ainda que não conheçam com precisão o conceito envolvido. Essa ideia parcial indica a presença de esquemas cognitivos ainda em construção, que, segundo Vergnaud (1998), operam como invariantes que precisam ser reorganizados com apoio didático, para promover uma compreensão mais profunda.

Dois estudantes apresentaram uma formulação mais precisa, dizendo que “a proporção entre nêutrons e prótons dentro do núcleo vai dizer se ele é instável ou estável”. Aqui, temos o teorema-em-ação T2: “Se a proporção entre nêutrons e prótons estiver equilibrada, o átomo será estável; caso contrário, será instável”. Esse teorema é verdadeiro, pois expressa com mais fidelidade o que sabemos atualmente sobre estabilidade nuclear: existe uma faixa ideal de razão nêutron/próton (n/p) que garante a coesão do núcleo. Essa faixa varia conforme o elemento, especialmente para os de número atômico elevado (Atkins, Jones e Laverman, 2018). O uso da palavra “proporção” demonstra que esses estudantes ativaram esquemas conceituais mais refinados, com maior articulação entre as variáveis envolvidas, o que, de acordo com Moreira (2011), é um indicativo de aprendizagem significativa.

Por outro lado, quatro estudantes deram respostas vagas, como “átomo regular ou irregular”. Essas respostas ativam conceitos-em-ação indefinidos, e os teoremas-em-ação foram classificados como indeferidos, por não apresentarem informações suficientes para permitir uma interpretação clara do raciocínio do estudante. Aparentemente, há uma tentativa de expressar algo sobre o comportamento ou o “estado” do átomo, mas sem qualquer fundamentação nas variáveis físicas relevantes. Isso pode indicar, segundo Ausubel (2003), a ausência de subsunçores adequados, o que dificulta a ancoragem do novo conteúdo em estruturas cognitivas já existentes.

No geral, os dados mostram que a maioria dos estudantes reconhece que há alguma relação entre prótons e nêutrons no núcleo que determina a estabilidade de um átomo. Os invariantes operatórios predominantes se baseiam na ideia de “equilíbrio” entre essas partículas, o que é conceitualmente promissor. No entanto, muitos estudantes ainda acreditam que esse equilíbrio se dá apenas quando há igualdade entre os dois, o que limita a compreensão de isótopos estáveis com diferentes proporções.

No quadro 19 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de Meia Vida.

Quadro 19 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de meia vida

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Meia vida	5 estudantes	<i>“É quando a vida da bateria do celular ta pela metade” – E12</i>	Indefinido
	8 estudantes	<i>“Tempo para que a atividade radioativa se reduza pela metade” - E14</i>	Meia-vida como o tempo de redução da atividade radioativa

	2 estudantes	<i>“Um elemento que tem radiação” - E7</i>	Indefinido
	2 estudantes	<i>“É o tempo necessário para que a matéria se reduza pela metade” - E2</i>	Meia-vida como o tempo de redução proporcional da matéria
	8 estudantes	Não responderam	-

Ao analisar as respostas dos estudantes sobre o conceito de meia-vida, observamos a presença de diferentes níveis de compreensão e de elaboração conceitual. Um grupo formado por cinco estudantes utilizou analogias do cotidiano, como: “é quando a vida da bateria do celular tá pela metade”. Embora essa comparação com o desgaste da bateria do celular não esteja cientificamente correta, ela revela uma tentativa legítima de ancoragem do conceito em vivências próximas à realidade do estudante. Como propõe Ausubel (2003), o aprendizado significativo ocorre quando novas informações se conectam a conhecimentos prévios relevantes. Nesse caso, o conhecimento prévio está presente, mas o invariante operatório é insuficiente para gerar um esquema conceitual adequado sobre decaimento radioativo. Portanto, essa resposta foi classificada como um teorema-em-ação indefinido, já que falta clareza sobre o processo físico ou químico envolvido.

Por outro lado, um segundo grupo, com oito estudantes, apresentou uma formulação mais alinhada ao conceito científico: “tempo para que a atividade radioativa se reduza pela metade”. Essa afirmação ativa o teorema-em-ação T1, que representa com precisão o significado de meia-vida: trata-se de um parâmetro que descreve o tempo necessário para que a atividade radioativa (ou a quantidade de núcleos instáveis) caia à metade do valor original. Esse conceito é central para o entendimento do decaimento exponencial de núcleos radioativos, como descrito por Atkins, Jones e Laverman (2018), e sua presença nas respostas indica a ativação de esquemas conceituais mais elaborados, conforme previsto por Vergnaud (1990).

Em contraste, dois estudantes disseram que meia-vida é “um elemento que tem radiação”. Essa resposta ativa um teorema-em-ação incorreto ou indefinido, pois confunde o conceito de meia-vida com a própria existência de radioatividade. Essa associação vaga sugere que esses estudantes reconhecem a palavra “meia-vida” como algo relacionado à radiação, mas não compreendem que se trata de uma medida temporal associada à taxa de decaimento, e não a uma característica do elemento em si. Segundo Moreira (2011), esse tipo de concepção imprecisa é comum quando os conceitos são trabalhados de forma descontextualizada e sem o suporte de subsunçores adequados.

Outro grupo, com dois estudantes, trouxe uma definição um pouco mais próxima: “é o tempo necessário para que a matéria se reduza pela metade”. Embora a resposta ainda não mencione explicitamente a radioatividade, ela contém elementos estruturais importantes. A ideia de “tempo” e “redução pela metade” se aproxima da definição correta. Esse teorema-em-ação T2 pode ser considerado verdadeiro com ressalvas: a meia-vida realmente representa o tempo em que ocorre a redução pela metade, mas o termo “matéria” é vago e pode ser interpretado erroneamente como perda de massa visível. De acordo com Atkins, Jones e Laverman (2018), a meia-vida se refere à quantidade de núcleos radioativos e não à matéria no sentido macroscópico. Ainda assim, a estrutura do raciocínio indica que esses estudantes estão em processo de construção conceitual, aproximando-se de uma compreensão mais precisa. Por fim, chama atenção o número de 8 estudantes que não responderam. Isso pode indicar que o conceito de meia-vida foi pouco trabalhado ou que foi um conceito pouco consolidado.

Em síntese, a análise mostra que alguns estudantes já possuem uma noção bastante próxima da definição científica de meia-vida, especialmente ao relacioná-la com a redução da atividade radioativa ao longo do tempo. Outros ainda operam com noções vagas ou analogias cotidianas que precisam ser trabalhadas para se transformarem em conceitos corretos. Os invariantes operatórios mais bem elaborados já indicam que meia-vida está associada ao tempo e à transformação de algo, mas ainda falta clareza em muitos casos sobre o que está se transformando e por quê.

No quadro 20 apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes sobre o conceito de decaimento radioativo.

Quadro 20 – Análise dos invariantes operatórios para o conceito de decaimento radioativo.

Conceito-em-ação	Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Teorema-em-ação
Decaimento radioativo	2 estudantes	“ <i>Liberção de radiação</i> ” - E10	Indefinido
	5 estudantes	“ <i>Comprimento do átomo por causa da instabilidade</i> ” - E2	Indefinido
	2 estudantes	“ <i>Quando a radiação começa a baixar</i> ” - E5	Decaimento radioativo como diminuição da radiação
	2 estudantes	“ <i>Quando átomos começam a se desintegrar</i> ” - E4	Decaimento radioativo como desintegração de átomos
	2 estudantes	“ <i>O núcleo atômico emite radiação para se tornar estável</i> ” - E14	Decaimento radioativo como um processo para o átomo se tornar estável
	12 estudantes	Não responderam	-

As respostas dos estudantes à pergunta sobre o decaimento radioativo revelaram diferentes níveis de compreensão e articulação conceitual. Um primeiro grupo, formado por dois estudantes, respondeu apenas com a frase: “liberação de radiação”. Embora essa resposta esteja relacionada ao fenômeno, uma vez que o decaimento envolve, de fato, a emissão de radiação, ela é vaga e incompleta. Falta contextualizar o que se transforma, porque a emissão ocorre e como esse processo contribui para a estabilidade do núcleo atômico. O teorema-em-ação identificado aqui foi classificado como indefinido, pois a resposta demonstra a ativação de esquemas conceituais muito iniciais, com ausência de subsunçores como sugerido por Ausubel (2003). O estudante reconhece a existência de um fenômeno físico, mas ainda não consegue integrar essa informação a um campo conceitual (Vergnaud, 1998).

Outro grupo, composto por cinco estudantes, apresentou respostas como: “comprimento do átomo por causa da instabilidade”. Embora confusa, essa formulação sinaliza uma tentativa de associar instabilidade a alguma forma de mudança estrutural no átomo. Entretanto, os termos utilizados não correspondem a conceitos científicos, o que indica que os estudantes ainda não conseguiram ativar invariantes operatórios adequados para representar o fenômeno. Segundo Moreira (2011), isso é típico de representações que ainda não passaram por um processo de reconstrução significativa: o estudante tenta explicar algo novo com esquemas antigos e inadequados, o que resulta em explicações imprecisas ou errôneas.

Dois estudantes afirmaram que o decaimento ocorre “quando a radiação começa a baixar”. Essa ideia ativa um teorema-em-ação parcialmente verdadeiro. De fato, a quantidade de radiação emitida por um material radioativo diminui com o tempo, à medida que os núcleos instáveis vão se transformando em núcleos mais estáveis. No entanto, a resposta omite o processo que leva a essa redução, a desintegração nuclear espontânea. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2023), o decaimento radioativo ocorre porque certos núcleos possuem excesso de energia ou instabilidade interna, e a emissão de partículas ou fótons de alta energia (radiação) é o caminho natural para alcançar uma configuração mais estável.

Outros dois estudantes apresentaram uma resposta conceitualmente mais consistente: “quando os átomos começam a se desintegrar”. Aqui, o teorema-em-ação é verdadeiro, pois capta a essência do decaimento radioativo, a desintegração espontânea

do núcleo atômico, com consequente emissão de partículas (alfa, beta) ou fótons (gama). Mesmo sem utilizar termos científicos como “núcleo instável” ou “radiação ionizante”, a resposta demonstra que esses estudantes já constroem esquemas representacionais mais próximos da ciência, o que aponta para um possível domínio do campo conceitual.

Um grupo final, também com dois estudantes, apresentou a resposta: “o núcleo atômico emite radiação para se tornar estável”. Essa formulação expressa o teorema-em-ação mais completo identificado nesta atividade. A resposta não apenas reconhece a emissão de radiação, mas explica sua função adaptativa, restaurar a estabilidade nuclear. Esse entendimento está alinhado ao modelo científico atual do decaimento radioativo. De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2023), o decaimento radioativo é um processo no qual o núcleo instável de um átomo perde energia ao emitir radiação de forma espontânea, com o objetivo de alcançar uma configuração mais estável. Essa explicação demonstra não apenas apropriação conceitual, mas integração causal e funcional dos fenômenos físicos, evidenciando um campo conceitual bem estruturado, conforme definido por Vergnaud (1998). Entretanto, é importante destacar que 12 estudantes não responderam à questão, o que representa uma quantidade significativa.

De forma geral, as respostas mostram que os estudantes reconhecem que o decaimento está relacionado à emissão de radiação e à instabilidade do átomo, mas muitos ainda não conseguem explicar como ou porque isso ocorre. Os invariantes operatórios que predominam ainda são superficiais, baseados em observações de que algo “diminui” ou “saí do átomo”, mas alguns estudantes já começam a construir explicações mais estruturadas, considerando a instabilidade e a busca por estabilidade como fatores centrais.

A partir da análise das respostas dos estudantes sobre os conceitos fundamentais envolvidos na compreensão da radioatividade, como átomo, núcleo atômico, partículas subatômicas, número atômico, isótopos, massa atômica, carga elétrica, estabilidade nuclear, meia-vida e decaimento radioativo, foi possível identificar diferentes teoremas-em-ação e conceitos-em-ação mobilizados. As análises revelaram, de forma geral, que a maioria dos estudantes opera com saberes descritivos, fragmentados ou simplificados, muitas vezes associados a definições memorizadas ou analogias do cotidiano, sem estabelecer relações significativas entre os conceitos.

Esses padrões de resposta revelam que, embora alguns estudantes demonstrem aproximações conceituais corretas, como no caso da definição de meia-vida ou da estrutura do átomo, muitos ainda apresentam concepções equivocadas ou incompletas,

como associar decaimento radioativo à carga de bateria ou definir isótopos com base na quantidade de elétrons. Além disso, a elevada quantidade de respostas em branco em diversos conceitos evidencia insegurança ou ausência de conhecimento em relação ao tema.

Utilizando esses dados, podemos observar um padrão de respostas em que o estudante é simplesmente um repetidor de conceitos e definições. Segundo Gombrade e Londero (2021), isso acontece quando eles não têm conhecimento prévio sobre um assunto, ou quando desejam realizar uma atividade avaliativa e acham que seria melhor repetir com suas próprias palavras o que o professor disse antes. O que os estudantes aprenderam não está relacionado a outros conhecimentos já adquiridos pelos estudantes, indicando indícios de aprendizagem mecânica. Neste caso, uma deficiência nesses conceitos tende a dificultar a aprendizagem sobre o campo conceitual da radioatividade. Esse padrão indica que os estudantes estão, em sua maioria, operando em um nível básico de cognição, onde a memorização e a reprodução de informações são mais comuns do que a aplicação, análise ou síntese de conhecimentos.

Diante de tais situações, Moreira (2012) menciona o uso de organizadores prévios, uma estratégia sugerida por Ausubel (2003) para promover a aprendizagem significativa. Desse modo, Moreira (2008, p.2) indica que organizadores prévios podem funcionar como “ideias âncora relevantes para a aprendizagem significativa do novo material, quanto estabelecer relações entre ideias, proposições e conceitos já existentes na estrutura cognitiva e aqueles contidos no material de aprendizagem”.

Essa dificuldade em compreender os conceitos básicos é evidenciada pelas altas taxas de respostas em branco e pelas associações equivocadas entre termos técnicos e ideias do cotidiano. Por exemplo, muitos estudantes relacionaram o decaimento radioativo à diminuição da carga de uma bateria: “É quando a vida da bateria do celular tá pela metade”; ou deram respostas vagas como “quando a radiação começa a baixar”, associando-se apenas à palavra “decair”, sem compreender o processo físico envolvido. Esses achados corroboram os dados de Silva (2023), que também identificou uma compreensão insuficiente sobre radioatividade entre estudantes, indicando a necessidade de maior aprofundamento nos conteúdos durante a formação escolar. Tal carência pode estar relacionada à ausência de abordagens significativas sobre radioatividade no ensino básico, ou à ênfase excessiva em memorização de definições sem articulação com situações reais ou modelos explicativos.

Dessa forma, embora os conhecimentos que os estudantes trazem consigo possam parecer limitados, mecânicos e repetitivos, eles são fundamentais para o estudo subsequente de tópicos mais avançados, como a própria radioatividade. Ausubel (2000) não nega a necessidade da aprendizagem mecânica, nem acredita que ela se oponha à aprendizagem significativa; na verdade, a considera como uma etapa preparatória importante, sobretudo quando os estudantes ainda não possuem os conhecimentos prévios necessários. Moreira (2005) complementa ao afirmar que a aprendizagem mecânica é necessária quando não existem estruturas cognitivas suficientes, servindo como base inicial para a construção de significados mais profundos posteriormente.

Logo podemos concluir que esse conhecimento inicial, mesmo que introdutório, forma a base sobre a qual novas informações podem ser construídas. Assim, é fundamental utilizar estratégias metodológicas que conectem o conhecimento prévio dos estudantes com novos conceitos, promovendo uma aprendizagem significativa. Dessa forma, o conhecimento que os estudantes trazem consigo é relevante, pois serve como um ponto de partida necessário para o desenvolvimento de uma compreensão mais profunda e integrada dos conceitos a serem estudados.

5.1.2 Conhecimentos prévios relacionados a Radioatividade

Na questão-chave, “Quando você pensa em radioatividade, que imagens vêm à sua mente? Explique as relações das imagens com o conceito de radioatividade”, o objetivo era identificar quais imagens ou conceitos os estudantes associavam ao conceito de radioatividade, dessa forma conseguimos identificar locais ou conceitos onde a radioatividade está presente. No quadro 21 analisamos e mostramos as respostas dadas pelos estudantes nessa atividade.

Quadro 21 – Análise dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes para questão chave do passo 2

Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Conceito-em-ação	Teorema-em-ação
8 estudantes	<i>Partículas perigosas, algo venenoso que pode matar ou ferir, causando algum tipo de doença – E1</i>	Partícula	Radiação como partículas perigosas
2 estudantes	<i>Raios de energia e acidentes radiológicos – E15</i>	Transporte de energia	Radiação são raios que causam acidentes
1 estudante	<i>Raios que tem muita energia acumulada – E9</i>	Transporte de energia	Radioatividade como energia

5 estudantes	<i>Algo invisível que pode causar doenças - E3</i>	Indefinido	Tudo que é invisível e tem radiação é perigoso
5 estudantes	<i>Eu penso nas situações como bomba nuclear e Chernobyl – E14</i>	Indefinido	Indefinido
1 estudante	<i>Penso em alguma coisa que é muito usado na medicina</i>	Indefinido	Indefinido
2 estudantes	<i>Coisas tóxicas que podem causar mutações através dos raios emitidos em nossos corpos e no meio ambiente – E12</i>	Transmutação da matéria/mutação	Radiação altera os organismos vivos ao emitir algo tóxico
1 estudante	<i>São raios que tem a capacidade de alterar a matéria e o corpo humano, além de causar doenças. - E11</i>	Transmutação da matéria/decaimento radioativo	

O grupo mais numeroso, composto por oito estudantes, descreveu a radiação como “partículas perigosas, algo venenoso que pode matar ou ferir, causando algum tipo de doença”. Aqui, o conceito-em-ação identificado foi o de partícula, e o teorema-em-ação foi classificado como "radiação como partículas perigosas", ou seja, falso do ponto de vista científico, embora expressivo do ponto de vista simbólico. Essa concepção reflete uma representação social de risco, fortemente influenciada pela mídia, por filmes e por catástrofes históricas. Os estudantes ativam invariantes operatórios descritivos, mas não articulam os mecanismos físicos que envolvem a emissão de partículas ou fótons a partir de núcleos instáveis (Atkins, Jones e Laverman, 2018). Isso evidencia o que Vergnaud (1998) denomina de campo conceitual pouco estruturado, que carece de articulação causal entre elementos fundamentais do fenômeno.

Outros quatro estudantes descreveram a radiação como “raios de energia” e “raios que têm muita energia acumulada”. Nesses casos, o conceito-em-ação é o de transporte de energia, e os teoremas-em-ação foram classificados como verdadeiros ou parcialmente verdadeiros, pois reconhecem que a radiação está associada à propagação de energia, embora sem distinguir se essa radiação é ionizante ou não. Como explicam Atkins, Jones e Laverman, (2018), a radiação pode ser composta por partículas (como as alfa e beta) ou por ondas eletromagnéticas (como os raios gama), sendo sua periculosidade determinada pela capacidade de ionização e penetração. Os estudantes que mobilizaram esse raciocínio demonstram esquemas em desenvolvimento, com aproximações relevantes ao modelo científico.

Cinco estudantes ofereceram respostas vagas, como “algo invisível que pode causar doenças”, “penso nas situações como bomba nuclear”, ou “penso em alguma coisa que é muito usada na medicina”. Essas respostas foram associadas a teoremas-em-

ação indefinidos, por não expressarem claramente relações causais ou mecanismos físicos. Contudo, elas revelam referenciais culturais e experiências indiretas, mostrando que a imagem da radiação é frequentemente construída fora do ambiente escolar, como alertam Moreira (2011) e Ausubel (2003): quando o ensino formal não atua como organizador conceitual, os estudantes recorrem a imagens fragmentadas do cotidiano, sem capacidade de síntese ou generalização científica.

Dois estudantes descreveram a radiação como algo que pode causar mutações, ativando um conceito-em-ação ligado à transmutação da matéria ou à mutação genética. O teorema-em-ação “radiação afeta os organismos vivos ao causar mutações” — é verdadeiro. Ele reconhece a interação entre radiação ionizante e o material genético, o que pode, de fato, provocar mutações, como apontado por Atkins, Jones e Laverman, (2018). Essa resposta representa um avanço em relação aos demais grupos, pois conecta a radiação a um efeito biológico concreto, ainda que sem detalhamento dos mecanismos de ação.

Um outro estudante descreveu a radiação como “rádios emitidos em nossos corpos e no meio ambiente”, o que sugere uma mistura conceitual entre radiação eletromagnética natural e radiação ionizante artificial, resultando em um teorema-em-ação impreciso: “emitir algo tóxico”. Essa resposta exige cuidado, pois embora haja radiações naturais (como a radiação cósmica ou do radônio), a expressão é genérica e não permite avaliar com clareza o esquema cognitivo mobilizado. A recomendação “preciso pensar melhor”, anotada na tabela, sugere que o próprio estudante percebeu a incompletude de sua resposta, o que pode ser um indício positivo de autorregulação do pensamento, conforme descrito por Vergnaud (1990).

Outro estudante escreveu que a radiação “tem a capacidade de alterar a matéria e o corpo humano, além de causar doenças”, ativando um conceito-em-ação relacionado à transmutação da matéria e decaimento radioativo. O teorema-em-ação é verdadeiro, pois reconhece que a radiação é um fenômeno que atua sobre a matéria, seja por causar alterações em estruturas atômicas, seja por gerar efeitos biológicos. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2023), a radiação tem a capacidade de ionizar átomos e quebrar ligações moleculares, o que pode alterar tecidos, causar mutações ou até levar à morte celular.

Por fim, 12 estudantes não responderam à questão, o que representa uma parcela expressiva da turma. Esse silêncio pode ser interpretado como um indicativo de baixa

familiaridade com o tema, ou como dificuldade em articular verbalmente um conceito abstrato e muitas vezes invisível no cotidiano.

A próxima atividade proposta foi uma reportagem onde os estudantes responderiam questões abertas relacionadas a esse texto. Para esse questionário, analisamos a questão 1, que tinha o objetivo de fazer os estudantes definirem o conceito de material radioativo a partir da leitura do texto. No quadro 22 apresentamos as respostas dadas pelos estudantes nessa atividade.

Quadro 22 – Classificação do nível cognitivo dos conceitos de radioatividade e análise dos invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes para questão 1

Frequência	Respostas dadas pelos estudantes	Conceito-em-ação	Teorema-em-ação
1	<i>Algo usado para ajudar a humanidade, mas se for usado errado pode trazer malefícios – E1</i>	Indefinido	Indefinido
1	<i>É algo que transmite e absorve radiação – E14</i>	Transporte de energia por radiação	Material radioativo como transmissor de radiação
2	<i>É uma matéria capaz de causar mudanças físicas no ser humano – E18</i>	Indefinido	Material radioativo como um elemento que causa interação com a matéria
6	<i>Um elemento químico perigoso – E6</i>	Indefinido	Indefinido
1	<i>Algo prejudicial a vida do planeta - E12</i>	Indefinido	Indefinido
2	<i>É um material tóxico que contamina coisas ao seu redor – E11</i>	Indefinido	Indefinido
7	<i>Aquilo que pode fabricar bombas nucleares e gases tóxicos – E7</i>	Indefinido	Indefinido
3	<i>O átomo de um elemento que tem a capacidade de transmitir uma radiação a partir de seu núcleo – E3</i>	Emissões radioativas	Material radioativo como um elemento que transmite radiação a partir de seu núcleo
2	<i>É algo que emite radiação, como as que tem na máquina de raio x quando quebra alguma parte do corpo – E8</i>	Emissões radioativas	Indefinido

O objetivo desta situação-problema foi investigar como os estudantes interpretam conceito de radioatividade, quando expostos a um texto fora do contexto tradicional de ensino formal, ou seja, mediado por linguagem jornalística ou cotidiana.

A atividade revelou tanto percepções espontâneas quanto associações simbólicas ativadas pelos estudantes, o que nos permitiu identificar diferentes conceitos-em-ação e teoremas-em-ação mobilizados durante a leitura e interpretação do texto.

As respostas revelaram uma diversidade de percepções, com predominância de representações indefinidas ou simbólicas, marcadas por associações com perigo, toxicidade, destruição ou contaminação ambiental. Por exemplo, seis estudantes descreveram o material radioativo como “um elemento químico perigoso”, enquanto outros o classificaram como “um material tóxico que contamina” ou “algo prejudicial à vida do planeta”. Essas formulações ativaram teoremas-em-ação classificados como indefinidos, uma vez que não explicam a natureza física ou química do material, nem o motivo pelo qual ele é perigoso. Conforme destacado por Vergnaud (1990), o uso de termos simbólicos sem articulação com propriedades estruturais revela que os estudantes operam com esquemas cognitivos genéricos, muitas vezes derivados de representações sociais e midiáticas, e não de conhecimento científico sistematizado.

Outros estudantes, como no caso de E1, afirmaram que o material radioativo “pode ajudar ou prejudicar dependendo do uso”. Essa resposta também foi classificada como de teorema-em-ação indefinido, pois embora demonstre uma visão ética ou utilitária do fenômeno, associada ao uso dual da radioatividade, não há ativação de conceitos estruturantes, como instabilidade nuclear ou emissão de partículas. Segundo Ausubel (2003), para que a aprendizagem seja significativa, os conceitos novos precisam se ancorar em conhecimentos prévios relevantes; nesse caso, a resposta mostra um julgamento de valor sem articulação com fundamentos científicos.

Já a resposta de E7, que descreve o material como ‘aquilo que pode fabricar bombas nucleares e gases tóxicos’, evidencia uma representação fortemente marcada pelo sensacionalismo midiático, no qual a radioatividade é associada quase exclusivamente ao perigo e à destruição, em vez de a aplicações científicas e tecnológicas contextualizadas (Lucena et al., 2017). Aqui, o invariante operatório mobilizado não parte da estrutura do conceito em si, mas de sua aplicação destrutiva, revelando um esquema simbólico e imaginário associado à devastação. Essa perspectiva, embora compreensível no contexto social, distancia-se da abordagem científica necessária ao ensino formal (Moreira, 2011).

Por outro lado, alguns estudantes demonstraram aproximações mais conceituais. No caso de E14, por exemplo, a resposta “algo que transmite e absorve radiação” ativou o conceito-em-ação de transporte de energia, gerando um teorema-em-ação verdadeiro,

ainda que simplificado: “material radioativo como transmissor de radiação”. Essa formulação indica que o estudante compreende, ainda que de forma geral, que a radioatividade envolve a emissão e absorção de energia. Como explicam Atkins e Jones (2018), materiais radioativos possuem núcleos instáveis, que ao se transformarem em núcleos mais estáveis, liberam energia sob forma de partículas ou radiação eletromagnética.

Outros dois estudantes, como E18, afirmaram que o material radioativo é “uma matéria capaz de causar mudanças físicas no corpo humano”. Essa resposta demonstra um esforço de articular a interação entre radiação e matéria biológica, ativando um conceito-em-ação válido. O teorema-em-ação resultante “material radioativo como elemento que causa interação com a matéria”, é considerado parcialmente verdadeiro, pois embora identifique corretamente um dos efeitos da radiação, não explicita o processo físico que o causa. A ideia de que a radiação pode interagir com tecidos vivos, provocando mutações ou danos celulares, é fundamental para compreender aplicações médicas e riscos ambientais (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

A resposta de E3 apresentou uma formulação mais próxima da linguagem científica: “O átomo de um elemento que tem a capacidade de transmitir uma radiação a partir de seu núcleo”. Essa resposta mobiliza o conceito-em-ação de emissões radioativas, e seu teorema-em-ação é considerado verdadeiro, pois está de acordo com a definição acadêmica de radioatividade: a emissão espontânea de partículas ou energia por núcleos atômicos instáveis (Halliday, Resnick e Walker, 2023). Ainda que os termos técnicos não sejam plenamente utilizados, a estrutura conceitual está presente, revelando um campo conceitual mais articulado (Vergnaud, 1990).

Já a resposta de E8, que descreve o material como “algo que emita radiação, como as máquinas de raio-X”, revela uma confusão comum entre material radioativo e fontes artificiais de radiação. Essa associação ativa um teorema-em-ação indefinido, pois confunde a origem natural da radioatividade (núcleos instáveis) com a emissão tecnológica controlada de radiação. Esse tipo de erro conceitual é frequente e mostra que o estudante compreende o efeito, mas não distingue os mecanismos físicos envolvidos. Como argumenta Moreira (2011), a construção de significados requer diferenciação progressiva e reconciliação integradora entre conceitos.

No total, 17 respostas foram classificadas como indefinidas, o que aponta para uma dificuldade generalizada em compreender o conceito de material radioativo. A maioria dos estudantes mobilizou esquemas simbólicos ou analogias vagas, revelando a

ausência de invariantes operatórios estáveis que orientem sua compreensão científica. A presença reduzida de teoremas válidos indica que o tema ainda não foi significativamente internalizado, sendo necessário reforçar o ensino com atividades que promovam a contextualização, a problematização e a aproximação com situações reais, estratégias essenciais para que os conceitos deixem de ser abstratos e se tornem mentalmente significativos, como defende Ausubel (2003).

No geral, a tabela reflete uma ampla disparidade nos níveis de compreensão dos estudantes sobre a radioatividade, com uma predominância de respostas associadas a percepções negativas ou vagas. Isso reforça a importância de trabalhar conceitos fundamentais, como o transporte de energia e a interação com a matéria, a fim de elevar o nível cognitivo dos estudantes. A teoria de Vergnaud ressalta a necessidade de articular conceitos e teoremas em ação, de forma que os estudantes consigam avançar do reconhecimento básico para uma compreensão mais ampla e integrada.

Para Ausubel (2003), se os estudantes tiverem uma estrutura cognitiva clara e organizada, conhecimentos importantes neste momento surgirão facilmente, conseguimos observar isso quando vimos a análise realizada em testes de conhecimentos prévios, onde esses dados permitem a elaboração e desenvolvimento de atividades metodológicas, como a experimentação, para promover ainda mais a construção do conhecimento. “Por outro lado, se a estrutura cognitiva de um estudante for instável” (Ausubel, 2003, p.10), ele encontrará grandes dificuldades de aprendizagem. Portanto, a construção do conhecimento é um processo ativo e contínuo, no qual os conhecimentos prévios desempenham um papel fundamental. Ao serem integrados aos novos conteúdos, os conhecimentos prévios são reorganizados e reestruturados, dando origem a novas compreensões mais estáveis e integrando-se a estrutura cognitiva do estudante integrando-se a estrutura cognitiva do estudante (Moreira, 2012).

Por meio das atividades aplicadas para identificar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre o tema, constatamos que a maioria dos estudantes possuem dificuldades para identificar e contextualizar conhecimentos relacionados ao campo conceitual da radioatividade, onde apenas conseguiam fazer a ligação do conceito a um dado ou situação lembrado, mas sem nenhum tipo aprofundamento ou ligação conceitual com o contexto proposto.

Contudo, mesmo que os estudantes se encontrem em um nível bem básico de conhecimento sobre o assunto, é fundamental considerar os conhecimentos prévios que

eles trazem consigo. Esses conhecimentos, quando relevantes, são denominados subsunçores, e são como os alicerces sobre os quais podemos construir um campo conceitual. Conforme Ausubel (2003) e Moreira (2012) defendem, quando os estudantes não possuem conhecimentos prévios suficientes sobre um determinado tema, o ponto de partida são os conhecimentos mecânicos. Portanto, ao reconhecermos a importância dos subsunçores, mesmo que elementares, podemos utilizar esses conhecimentos como ponto de partida para desenvolver um ensino mais significativo (Filho & Ferreira, 2022).

Outro ponto importante é o papel dos materiais didáticos e das estratégias pedagógicas utilizadas. Esses recursos estabelecem conexões entre os conceitos científicos e as experiências concretas dos estudantes, como filmes, notícias, simulações, debates, experimentos ou problemas contextualizados, têm o potencial de ampliar a compreensão dos estudantes, tornando os conteúdos mais acessíveis e relevantes. A utilização de materiais potencialmente significativos contribui para tornar o aprendizado mais duradouro, permitindo que o estudante avance gradualmente na sua capacidade de compreender e aplicar os conceitos (Moreira, 2011).

Nesse sentido, ao serem expostos a diferentes fontes de informação e vivências educativas, os estudantes passam a construir uma base conceitual mais sólida. Isso não apenas favorece a compreensão do campo conceitual da radioatividade, mas também contribui para o desenvolvimento de uma postura mais reflexiva e crítica diante dos temas científicos.

5.2 ANÁLISE DO PASSO 5 – COMPLEXIDADE

Com o objetivo de investigar os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes ao aplicarem os conceitos de radioatividade em situações cotidianas/reais, propusemos uma atividade que envolvia a análise de diversos recortes de notícias (Apêndice 4). Após a introdução dos conceitos teóricos em sala de aula, os estudantes foram desafiados a interpretar cada notícia, identificando como os conceitos de radioatividade eram empregados para explicar os fenômenos descritos. Essa atividade permitiu-nos analisar a forma como os estudantes mobilizavam seus conhecimentos prévios e construíam novos significados, evidenciando a natureza dinâmica do processo de aprendizagem.

Iniciamos nossa análise com um recorte de um jornal que abordava o acidente com o Césio-137 em Goiânia e as medidas de segurança adotadas para conter a

contaminação. A notícia descrevia como os resíduos radioativos foram enterrados em um local específico, sob camadas de terra, concreto e chumbo, com o objetivo de impedir a dispersão da radiação. A partir dessa informação, questionamos os estudantes sobre a necessidade dessas precauções e as razões pelas quais o enterro não poderia ser realizado de forma convencional. No quadro 23, apresentamos os invariantes operatórios mobilizados pelos estudantes bem como as justificativas dadas pelos mesmos.

Quadro 23 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 1

Conceito-em-ação	Teorema-em- ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Blindagem radioativa	O chumbo é eficiente para conter a radiação	“Porque o chumbo consegue conter a radioatividade e não deixa ela passar” – E1	11 estudantes
Poder de penetração, Blindagem radioativa	Materiais como terra oferecem menor proteção, enquanto chumbo e concreto têm maior capacidade de barrar partículas devido à densidade.	“Porque só com terra ela consegue passar, e com chumbo e concreto eles tem a capacidade de evitar que as partículas radioativas passem” – E7	7 estudantes
Poder de penetração, Blindagem radioativa	A radiação alfa é bloqueada por materiais simples como terra, enquanto radiações beta e gama requerem proteção mais densa, como chumbo.	“Porque o chumbo consegue evitar que os três tipos de radiação passem, talvez só com terra seria evitado apenas a mais fraca que é a alfa, mas com os outros materiais tem certeza que nenhuma das radiações irá passar” – E5	3 estudantes
Energia das partículas, Blindagem radioativa, Poder de penetração	Radiações de maior energia, como gama, necessitam de camadas mais densas ou múltiplas camadas de proteção para serem bloqueadas.	“Porque existe diferentes radiações saindo dali, aí quanto mais forte a radiação, mais camadas de proteções são necessárias, como o chumbo que consegue segurar até as mais fortes.” E18	3 estudantes
-	-	Não responderam	1 estudante

Conforme apresentado no Quadro 23, um grupo de 11 estudantes demonstrou compreender o papel do chumbo como material eficaz na contenção da radiação. A maioria aplicou o teorema-em-ação verdadeiro de que o chumbo bloqueia a passagem de partículas radioativas devido à sua alta densidade, ativando o conceito-em-ação de blindagem radioativa. A resposta de um estudante sintetiza essa percepção com clareza: “Porque o chumbo consegue conter a radioatividade e não deixa ela passar.” Essa compreensão está em conformidade com o conhecimento científico: materiais densos como o chumbo são comumente utilizados como barreiras protetoras contra radiações,

especialmente as do tipo gama, devido à sua capacidade de absorver energia sem se tornar radioativo (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

Outros sete estudantes aprofundaram essa lógica ao relacionar a eficácia da blindagem à densidade do material, estabelecendo comparações entre materiais como terra, chumbo e concreto. O teorema-em-ação mobilizado, “materiais mais densos oferecem maior proteção contra a radiação”, também foi considerado verdadeiro e revela um raciocínio estruturado sobre propagação e absorção de radiações ionizantes. Como explicou um dos estudantes: “Porque só com terra ela consegue passar, e com chumbo e concreto eles têm a capacidade de evitar que as partículas radioativas passem.” Nesse caso, os estudantes demonstraram reconhecer que a capacidade de penetração da radiação está diretamente relacionada à natureza da radiação e à resistência do meio material, conforme discutido por Halliday, Resnick e Walker (2023).

Três outros estudantes apresentaram uma explicação ainda mais refinada ao mencionar os diferentes tipos de radiação, alfa, beta e gama, relacionando corretamente seus níveis de penetração e os materiais necessários para bloqueá-las. O teorema-em-ação identificado é: “A radiação alfa pode ser bloqueada por materiais simples, como a terra, enquanto as radiações beta e gama exigem materiais mais densos, como o chumbo.” Um estudante sintetizou bem esse raciocínio ao afirmar: “Porque o chumbo consegue evitar que os três tipos de radiação passem, talvez só com terra seria evitada apenas a mais fraca que é a alfa, mas com os outros materiais tem certeza que nenhuma das radiações irá passar.” Esse tipo de resposta mostra que o estudante mobiliza esquemas conceituais bem estruturados, que se aproximam da explicação científica escolar, associando tipo de radiação, energia e poder de penetração o que caracteriza, na perspectiva de Vergnaud (1990), a construção de invariantes operatórios estáveis.

Além disso, três estudantes foram além da relação direta entre tipo de radiação e material, ativando conceitos de energia das partículas, ao afirmar que quanto maior a energia da radiação, mais camadas ou materiais densos são necessários para bloqueá-la. Esse entendimento ativa o teorema-em-ação verdadeiro de que “radiações de maior energia exigem barreiras mais espessas para serem contidas”. Um dos estudantes expressou isso ao dizer: “Porque existe diferentes radiações saindo dali, aí quanto mais forte a radiação, mais camadas de proteções são necessárias, como o chumbo que consegue segurar até as mais fortes.” Essa resposta revela não apenas a aplicação do

conceito de penetração da radiação, mas também a ideia de intensidade e energia associada, demonstrando avanço significativo na elaboração conceitual.

De modo geral, a análise das respostas dos estudantes diante do recorte de uma notícia real sobre o acidente com o cézio-137 em Goiânia evidencia um nível satisfatório de compreensão sobre o conceito de blindagem radioativa. A maioria demonstrou capacidade de associar corretamente materiais como chumbo e concreto à sua eficácia na contenção de partículas radioativas, seja por meio do reconhecimento da densidade do material, do tipo de radiação envolvido ou do nível de energia associado ao processo. Esse desempenho sugere que os estudantes foram capazes de mobilizar teoremas-em-ação válidos e consistentes, ancorando seus raciocínios em conceitos que, mesmo que não totalmente formalizados, revelam aproximação com o campo conceitual da Física Nuclear.

Para próxima questão utilizamos como ponto de partida uma notícia que abordava o extravio de uma cápsula de cézio-137. A reportagem alertava para os riscos que esse material representa para as próximas décadas. A partir dessa notícia, questionamos os estudantes sobre os motivos que tornam o cézio-137 uma ameaça persistente ao longo do tempo, mesmo após o incidente inicial. A análise das respostas dos estudantes, apresentada no quadro 24, permitiu identificar os invariantes operatórios mobilizados para explicar a radioatividade do cézio-137 e sua persistência no ambiente.

Quadro 24 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 2

Conceito-em-ação	Teorema-em-ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Decaimento radioativo, Tempo de desintegração	Se houver material radioativo presente, então ele perderá sua massa gradualmente ao longo de décadas.	Porque o material vai sumindo com o tempo, aí ele demora décadas para sumir tudo e não ter mais risco	8 estudantes
Decaimento radioativo	Se houver material radioativo presente, então ele continuará emitindo radiação até que decaia completamente.	Porque enquanto o material não decair tudo, ele irá ficar emitindo radiação	7 estudantes
Tempo de desintegração, Meia-vida	O material decai progressivamente e permanece emitindo radiação até desaparecer.	Porque o material vai decair até sumir por completo, mas enquanto tiver material ele vai representar ameaça, e como falou que são décadas, então o provavelmente o material vai demorar décadas para terminar de decair	4 estudantes
Meia-vida, Decaimento radioativo	Se o material tiver uma meia-vida longa, então	Está relacionado com a meia vida do cézio, quanto maior sua meia vida mais tempo ele vai demorar para	3 estudantes

	ele permanecerá no ambiente por mais tempo	sumir do ambiente, dessa forma criando perigo enquanto não diminuir o suficiente	
Meia-vida, Decaimento radioativo	A meia-vida determina o tempo necessário para que metade da massa de um material radioativo desapareça, afetando sua duração no ambiente.	Todo material radioativo vai se perdendo com o tempo por causa da sua meia vida, aí sempre que passa uma meia vida tem metade do peso que tinha antes. Ai como a notícia fala que vai demorar décadas, é por causa que vai ser esse tempo para não ter mais peso do negócio radioativo que irá trazer perigo.	1 estudante
-	-	Não responderam	2 estudantes

Um grupo de oito estudantes ativou invariantes operatórios ao associar a presença do material radioativo com a perda gradual de sua massa ao longo do tempo, utilizando o teorema-em-ação verdadeiro: “Se houver material radioativo presente, ele perderá sua massa gradualmente ao longo de décadas.” O conceito-em-ação mobilizado foi o de Decaimento Radioativo, muitas vezes acompanhado da noção de tempo de desintegração. A fala de um estudante ilustra esse entendimento: “Porque o material vai sumindo com o tempo, aí ele demora décadas para sumir tudo e não ter mais risco.” Essa compreensão está em sintonia com a explicação científica do decaimento: os núcleos instáveis se desintegram em outros mais estáveis, liberando partículas e energia, processo cuja taxa é descrita pela meia-vida do isótopo (Halliday, Resnick e Walker, 2023).

Outros sete estudantes também demonstraram compreensão adequada ao afirmar que a radiação continua sendo emitida enquanto houver material radioativo, aplicando o teorema-em-ação verdadeiro: “Se houver material radioativo, então continuará emitindo radiação até que decaia completamente.” Esse raciocínio revela uma apropriação do conceito de atividade radioativa como consequência direta da presença de átomos instáveis. A fala: “Porque enquanto o material não decair tudo, ele irá ficar emitindo radiação”, demonstra que esses estudantes ativaram esquemas consistentes, ainda que simplificados, baseados na relação direta entre estrutura atômica instável e emissão contínua (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

Um grupo de quatro estudantes conseguiu integrar os dois aspectos anteriores, desintegração e emissão contínua, propondo o teorema-em-ação: “O material decai progressivamente e emite radiação até desaparecer.” A resposta: “Porque o material vai decair até sumir por completo, mas enquanto tiver material ele vai representar ameaça,

e como falou que são décadas, então provavelmente o material vai demorar décadas para terminar de decair”, demonstra a construção de representações mais estáveis, compatíveis com o campo conceitual da radioatividade. Essa articulação revela que o estudante estabeleceu relações causais entre tempo, desintegração nuclear e persistência da radiação, exatamente como descrito na TCC de Vergnaud (1990), que define essas relações como invariantes operatórios fundamentais para o domínio conceitual da Física Nuclear.

Além disso, três estudantes destacaram a meia-vida como fator determinante da permanência do material no ambiente, ativando o teorema-em-ação de que “Se o material tiver meia-vida longa, então permanecerá ativo por mais tempo.” A meia-vida é definida como o intervalo necessário para que metade dos núcleos radioativos de uma amostra se desintegre (Atkins, Jones e Laverman, 2018), sendo um dos principais parâmetros para prever a duração do risco. Como expressou um estudante: “Está relacionado com a meia-vida do cézio, quanto maior sua meia-vida mais tempo ele vai demorar para sumir do ambiente, dessa forma criando perigo enquanto não diminuir o suficiente.”

Um caso específico envolveu um estudante que compreendeu a meia-vida de forma quantitativa, afirmando que “sempre que passa uma meia-vida tem metade do peso que tinha antes”. O teorema-em-ação “A meia-vida determina o tempo necessário para que metade da massa desapareça”, é verdadeiro, embora a ideia de “peso” devesse ser substituída por número de núcleos instáveis, para maior precisão. Essa formulação indica apropriação inicial do conceito, mas ainda marcada por representações concretas, como é comum em etapas iniciais da aprendizagem significativa (Ausubel, 2003; Moreira, 2011).

De forma geral, a atividade permitiu identificar que os estudantes já iniciam a formação de esquemas coerentes sobre decaimento e meia-vida, especialmente ao compreender que a presença do material implica emissão contínua de radiação, e que o tempo de permanência está relacionado à meia-vida do isótopo, no caso, o cézio-137. Os teoremas-em-ação identificados foram em sua maioria válidos e revelaram um avanço conceitual em relação às ideias espontâneas mais comuns sobre o tema.

Para a próxima questão, utilizamos uma notícia da mídia que explorava a relação entre radiação e o transporte de energia por meio de partículas e ondas. Em um segundo momento, a notícia abordava a radioatividade como um processo de perda de energia devido à emissão de radiação. Com base nesse contexto, os estudantes foram

questionados sobre como esses fenômenos acontecem, buscando compreender os mecanismos de transporte e perda de energia associados à radioatividade. A análise das respostas dos estudantes, apresentada no quadro 25, permitiu identificar os invariantes operatórios mobilizados para explicar como a energia é transmitida por partículas e ondas e como ocorre o processo de decaimento radioativo.

Quadro 25 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 3

Conceito-em-ação	Teorema-em-ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Dcaimento Radioativo, Conservação de Energia	Se um material radioativo emite radiação, então ele perde energia gradualmente.	Porque quando emite radiação se perde energia	10 estudantes
Emissões Radioativas, Transporte de Energia por Partículas e Ondas	Se um material radioativo emite radiação, então ele perde energia gradualmente.	Quando o material emite partículas ou ondas de radiação, ele está diminuindo sua energia, e por isso vai perdendo energia aos poucos	5 estudantes
Estabilidade Nuclear, Dcaimento Radioativo	Se o núcleo de um elemento é instável, então ele emitirá radiação para alcançar maior estabilidade	A radiação acontece porque o núcleo de um elemento não é estável, então ele perde energia para tentar se estabilizar.	3 estudantes
Dcaimento Radioativo, Emissões Radioativas	Se um elemento emite partículas alfa, beta ou gama, então ele perde energia e massa progressivamente enquanto decai.	Quando um elemento emite radiação alfa, beta e gama, ela está fazendo o elemento perder energia em forma de massa, até porque o elemento vai decaindo com o tempo e se tornando menor	2 estudantes
Transporte de Energia por Partículas e Ondas, Emissões Radioativas, Dcaimento Radioativo	Se um tipo de radiação é emitido, então ele transporta energia de diferentes formas, podendo também perder massa em alguns casos (ex.: radiação alfa).	Existem vários tipos de radiação, como por exemplo a solar que é transferida pelos raios do sol, já a radioatividade tem as partículas e raios alfa, beta e gama, que quando são emitidos sempre perdem alguma coisa em cada uma delas, por exemplo na alfa ela perde massa e dessa forma também perde energia.	1 estudante
-	-	Não responderam	4 estudantes

O grupo composto por dez estudantes demonstrou uma compreensão inicial do conceito de decaimento radioativo ao associar a emissão de radiação à perda gradual de energia. Esses estudantes mobilizaram o teorema-em-ação: “Se um material radioativo emite radiação, então ele perde energia gradualmente”, revelando uma concepção alinhada ao princípio da conservação de energia. A frase “Porque quando emite radiação se perde energia” sintetiza esse entendimento, indicando que os estudantes já ativam

esquemas básicos ligados ao conceito de transformação nuclear, uma forma de reorganização da matéria com liberação de energia, conforme discutido por Halliday, Resnick e Walker (2023).

Outro grupo, com cinco estudantes, apresentou uma compreensão ainda mais aprofundada ao destacar a natureza corpuscular ou ondulatória da radiação emitida. Ao mobilizarem os conceitos de “Emissões Radioativas” e “Transporte de Energia por Partículas e Ondas”, aplicaram o teorema-em-ação: “Se um material emite partículas ou ondas de radiação, então ele reduz sua energia ao longo do tempo”. Esse grupo ativou invariantes operatórios mais estruturados, ao relacionar a perda de energia à emissão de partículas como alfa e beta, ou de radiação gama, distinção fundamental para a compreensão dos processos de decaimento radioativo, como também evidenciado em Halliday, Resnick e Walker (2023).

Já um terceiro grupo, com três estudantes, mobilizou esquemas conceituais ainda mais consistentes ao associar a emissão de radiação à instabilidade nuclear. Aplicaram o teorema-em-ação: “Se o núcleo de um elemento é instável, então ele emitirá radiação para alcançar maior estabilidade”. Essa representação está diretamente conectada à compreensão científica de que o decaimento é uma resposta natural à instabilidade dos núcleos atômicos, e que a emissão de energia visa atingir um estado de menor energia interna. Esse tipo de raciocínio está relacionado ao que Vergnaud (1990) define como um “campo conceitual articulado”, onde os conceitos de energia, instabilidade e transformação são tratados de maneira integrada.

Dois estudantes demonstraram conhecimento parcial ao afirmar que a emissão de radiação alfa, beta e gama resulta na perda de massa e energia. Aplicaram o teorema-em-ação: “Se um elemento emite partículas alfa, beta ou gama, então ele perde energia e massa progressivamente enquanto decai”. Embora a formulação esteja próxima da verdade, há uma imprecisão conceitual importante: apenas as partículas alfas têm massa significativa associada; já as radiações beta e gama envolvem, predominantemente, a liberação de energia com perda de massa desprezível (Halliday, Resnick e Walker, 2023). Isso mostra que os estudantes ativaram representações relevantes, mas ainda carecem de refinamento nos esquemas conceituais.

Um estudante destacou a diversidade dos tipos de radiação, conectando-os ao transporte de energia e à perda de massa. A fala: “Existem vários tipos de radiação, como por exemplo a solar... já a radioatividade tem partículas e raios alfa, beta e gama...” revela que esse estudante ativou um campo conceitual mais abrangente, ainda que com

um pequeno desvio ao comparar a radiação solar, oriunda de processos de fusão nuclear, com a radioatividade, que resulta do decaimento de núcleos instáveis. Apesar disso, o teorema-em-ação “Se há emissão de diferentes tipos de radiação, então ocorre transporte de energia e, em alguns casos, perda de massa” é considerado verdadeiro, demonstrando uma boa aproximação com o modelo científico

A análise das respostas mostra a ativação de diferentes esquemas e representações sobre o fenômeno do decaimento radioativo. Segundo Ausubel (2003), a aprendizagem significativa ocorre quando novas informações se conectam a conhecimentos já existentes. Nesse caso, nota-se que a maioria dos estudantes possui conceitos prévios coerentes, que ainda necessitam de elaboração para alcançar a complexidade do modelo científico. As respostas em branco, dadas por quatro estudantes, indicam lacunas na formação dos esquemas conceituais sobre o tema, sugerindo que o nível de complexidade da questão pode ter representado uma barreira cognitiva. A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud (1998) também nos ajuda a entender essas dificuldades como indícios do processo em curso de construção de teoremas-em-ação mais adequados à formalização científica.

Para a próxima questão, utilizamos um recorte de notícia que abordava a natureza instável dos elementos radioativos e como a natureza busca a estabilidade ao longo do tempo. O autor da reportagem explicou que, para um elemento radioativo, como o cézio-137, alcançar a estabilidade, ele passa por um processo de decaimento radioativo. Com base nesse recorte, questionamos os estudantes sobre como explicariam esse processo e como o tempo necessário para que um elemento radioativo se torne estável se relaciona com o conceito de meia-vida. A análise das respostas dos estudantes, apresentada no quadro 26 permitiu identificar os invariantes operatórios mobilizados por eles.

Quadro 26 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 4

Conceito-em-ação	Teorema-em- ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Decaimento Radioativo, Estabilidade Nuclear, Meia-Vida	Se um elemento radioativo decai, então ele está tentando se tornar estável através do decaimento.	É o elemento decaindo para virar estável. A gente chama de meia vida esse conceito.	10 estudantes
Meia-Vida, Decaimento Radioativo	Se a meia-vida de um elemento é longa, então ele permanecerá no ambiente por mais tempo, emitindo radiação.	O elemento vai ser perigoso porque ele vai decair até se tornar estável, mas como falou na reportagem, isso vai demorar milhares de anos, porque a meia vida desse elemento é muito longa, aí causa essa demora.	6 estudantes

Decaimento Radioativo, Meia-Vida, Conservação de Massa e Energia	Se um elemento está instável, então ele perde massa e energia até se estabilizar.	Um elemento instável vai decaindo até virar estável, nesse tempo até virar estável ele perde algumas coisas como massa e quando chega na metade a gente chama de meia vida.	4 estudantes
Decaimento Radioativo, Emissões Radioativas, Meia-Vida, Conservação de Massa e Energia	Se um elemento instável libera partículas radioativas, então ele muda sua configuração até estabilizar.	Um elemento instável vai liberar partículas radioativas e mudando sua configuração como de massa e prótons, assim ele se torna um novo elemento, e vai fazendo isso até virar um elemento estável. Nessa liberação de partículas, como falei, perde-se massa, ou seja, com o tempo ele vai ficando cada vez mais leve, quando essa massa chega na metade do que era anteriormente chegamos na meia vida desse elemento.	2 estudantes
-	-	Não responderam	3 estudantes

Um grupo de dez estudantes associou corretamente o decaimento radioativo ao processo de estabilização nuclear. Ao utilizarem o teorema-em-ação "Se um elemento instável está decaindo, então ele perde energia e massa até atingir a estabilidade", esses estudantes demonstraram compreender a relação entre instabilidade e decaimento. A justificativa "É o elemento decaindo para virar estável. A gente chama de meia-vida esse conceito" evidencia a compreensão do conceito de meia-vida como uma medida do tempo necessário para que a radioatividade de uma amostra seja reduzida pela metade, demonstrando o comportamento exponencial do decaimento e sua relevância na previsão da persistência de materiais radioativos no ambiente (Halliday, Resnick e Walker 2023).

Seis estudantes aprofundaram a análise, enfatizando que a meia-vida longa de alguns elementos é responsável pela persistência do perigo no ambiente por milhares de anos. Eles mobilizaram os conceitos de Meia-Vida, Estabilidade Nuclear e Conservação de Massa e Energia, aplicando o teorema: "Se um elemento possui uma meia-vida longa, então ele permanecerá instável e perigoso por mais tempo". Esse teorema é validado pelo fato de que a meia-vida é uma medida constante para cada elemento radioativo e representa o tempo necessário para que metade de sua quantidade inicial decaia (Atkins, Jones e Laverman, 2018). Essa compreensão é ilustrada pela resposta: "O elemento vai ser perigoso porque ele vai decair até se tornar estável, mas como falou na reportagem, isso vai demorar milhares de anos, porque a meia vida desse elemento é muito longa, aí causa essa demora".

Quatro estudantes destacaram a ideia de que o decaimento é um processo contínuo de perda de massa e energia até que o elemento alcance a estabilidade. Esses estudantes mobilizaram os conceitos de Decaimento Radioativo, Meia-Vida e Conservação de Massa e Energia, articulando o teorema: “Se um elemento instável está decaindo, então ele perde massa e energia gradualmente, até atingir a estabilidade”. Esse teorema é cientificamente correto, pois o decaimento envolve a emissão de partículas como alfa e beta, ou radiação gama, que levam parte da energia e massa do núcleo instável, permitindo que ele se aproxime de um estado mais estável (Halliday, Resnick e Walker, 2023). A resposta: “Um elemento instável vai decaindo até virar estável, nesse tempo até virar estável ele perde algumas coisas como massa e quando chega na metade a gente chama de meia vida.” reforça esse entendimento.

Dois estudantes apresentaram uma visão mais detalhada sobre a transformação do elemento durante o decaimento, enfatizando a emissão de partículas radioativas e mudanças na configuração nuclear. Eles mobilizaram os conceitos de Emissões Radioativas, Conservação de Massa e Energia e Estabilidade Nuclear, aplicando o teorema: “Se um elemento instável emite partículas radioativas, então ele perde massa e muda sua configuração até se tornar estável”. Esse teorema é fundamentado no decaimento nuclear (Atkins, Jones e Laverman, 2018) e indica que os estudantes começam a construir esquemas conceituais mais consistentes.

Observa-se que o conceito de Emissões Radioativas foi utilizado para explicar como a emissão de partículas é parte do processo de decaimento. Já o conceito de Conservação de Massa e Energia foi mobilizado ao descrever que, ao liberar partículas, o elemento perde massa e energia continuamente. A ideia de que o elemento está “mudando sua configuração como de massa e prótons” mostra como os estudantes associaram essa transformação à reorganização do núcleo atômico, baseando-se no conceito de estabilidade nuclear (Halliday, Resnick e Walker, 2023).

A mobilização desses conceitos indica uma aprendizagem significativa em curso, no sentido proposto por Ausubel (2003), uma vez que os estudantes estão relacionando novas informações a estruturas cognitivas já existentes. Moreira (2011) reforça que esse tipo de aprendizagem ocorre quando há uma ancoragem de novos significados a conceitos previamente construídos, evidenciado aqui pelas relações feitas entre meia-vida, estabilidade e decaimento. Por fim, três estudantes não apresentaram respostas, o que pode indicar dificuldades em elaborar representações conceituais mais

estruturadas, ou a ausência de esquemas prévios suficientes para ativar um conceito-em-ação adequado (Vergnaud, 1990).

Para a próxima questão, utilizamos um recorte da mídia que mencionava várias vezes o termo "radioisótopos" ao discutir os impactos da radioatividade no ambiente. A reportagem abordava como esses elementos podem representar riscos significativos e prolongados, especialmente em casos de contaminação ambiental. Com base nesse recorte, questionamos os estudantes sobre como explicariam o conceito de radioisótopo para alguém sem conhecimento prévio sobre o assunto. A análise das respostas, apresentada no quadro 27, permitiu identificar os invariantes operatórios mobilizados para explicar o que caracteriza um radioisótopo.

Quadro 27 – Análise dos invariantes operatórios para o recorte 5

Conceito-em-ação	Teorema-em-ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Instabilidade Nuclear, Isótopo, Radioisótopo	Se um elemento possui um isótopo radioativo, então ele emite radiação por causa de sua instabilidade nuclear.	É um isótopo de um elemento radioativo	12 estudantes
Instabilidade Nuclear, Radioisótopo	Se um isótopo é instável, então ele emite radiação até alcançar estabilidade.	É um isótopo instável de um elemento que transmite radiação até virar estável	4 estudantes
Emissões Radioativas, Radioisótopo, Decaimento	Se um isótopo se desintegra, então ele emite partículas ou ondas de radiação.	É um isótopo que se desintegra emitindo partículas ou ondas, como alfa, beta ou gama	3 estudantes
Isótopo, Instabilidade Nuclear, Radioisótopo	Se um elemento possui isótopos com números diferentes de nêutrons, então pode haver instabilidade nuclear, formando um radioisótopo.	Um isótopo é uma variação de um elemento com mesmo número de prótons mais um número diferente de nêutrons. Já o radioisótopo também tem um núcleo instável.	3 estudantes
-	-	Não responderam	3 estudantes

No primeiro grupo, composto por 12 estudantes, observou-se uma associação genérica entre radioisótopos e elementos radioativos. As respostas indicam o uso do teorema-em-ação: “Se um elemento é radioativo, então seus isótopos também são.” Esse teorema é verdadeiro, pois, por definição, radioisótopos são isótopos instáveis de determinados elementos que emitem radiação ao buscarem estabilidade (Atkins, Jones e Laverman, 2018). No entanto, a formulação apresentada pelos estudantes não explorou aspectos fundamentais como a instabilidade nuclear ou os mecanismos do decaimento radioativo, elementos essenciais para consolidar o conceito com maior profundidade.

O conceito-em-ação “radioisótopo” foi mobilizado de forma inicial, refletindo uma compreensão ainda superficial. Nesse caso, o invariante operatório predominante parece basear-se em uma associação descritiva entre radioatividade e presença de isótopos, sem a articulação de representações mentais mais complexas. Segundo Vergnaud (1990), a ausência de vínculos conceituais profundos pode indicar que o esquema cognitivo ainda está em construção, sem conexões operatórias que permitam sua mobilização em novos contextos.

Já no segundo grupo, com quatro estudantes, identificamos um avanço significativo. Esses estudantes conseguiram relacionar a instabilidade dos radioisótopos à emissão de radiação e ao processo de decaimento até que ocorra a estabilização do núcleo. O teorema-em-ação mobilizado foi: “Se um isótopo é instável, ele emite radiação até se estabilizar.” Essa compreensão, embora ainda com explicações simplificadas, mobiliza corretamente os conceitos de emissões radioativas, instabilidade nuclear e decaimento (Atkins, Jones e Laverman, 2018). De acordo com Moreira (2011), o reconhecimento da instabilidade como causa do decaimento já representa um nível mais elaborado de aprendizagem significativa, pois envolve a internalização de uma relação causal entre estrutura e comportamento da matéria.

Para três estudantes, observamos uma compreensão ainda mais técnica do comportamento dos radioisótopos. Eles aplicaram o teorema-em-ação: “Se um isótopo se desintegra, ele libera partículas ou ondas, resultando em alterações em sua massa ou energia.” Tal resposta evidencia o uso dos conceitos de emissões radioativas e decaimento de forma mais explícita, mencionando inclusive partículas como alfa, beta ou radiações gama. Essa elaboração sugere que os estudantes mobilizaram esquemas cognitivos mais consolidados, capazes de integrar diferentes representações, como a transformação nuclear e os tipos de partículas envolvidas no processo (Halliday, Resnick e Walker 2023).

No último grupo que respondeu, composto também por três estudantes, houve uma articulação ainda mais robusta. Esses estudantes foram além da definição básica de isótopos e integraram à sua resposta a noção de instabilidade nuclear como fator determinante da radioatividade. O teorema-em-ação foi: “Se um núcleo é instável, ele decai para alcançar estabilidade.” Aqui, os conceitos de “isótopo”, “instabilidade nuclear” e “radioisótopo” foram claramente mobilizados de forma articulada. Segundo Ausubel (2003), esse tipo de resposta demonstra que o estudante estabeleceu relações

significativas entre novos conteúdos e subsunçores já estruturados, o que indica aprendizagem significativa.

Esse nível de explicitação também sugere o uso de representações mais elaboradas do comportamento nuclear, provavelmente influenciadas por leituras ou aulas anteriores que trataram da estrutura do núcleo atômico, sua instabilidade e as consequências energéticas do decaimento. Por fim, três estudantes não apresentaram resposta, o que pode apontar tanto para dificuldades na apropriação dos conceitos quanto para falhas na consolidação dos esquemas mentais necessários para interpretar o termo “radioisótopo”. Como observa Vergnaud (1990), a ausência de resposta não significa necessariamente ausência de conhecimento, mas pode refletir um impasse entre o conhecimento mobilizável e a situação problema apresentada.

A análise dos recortes revelou diferentes níveis de compreensão e articulação conceitual entre os estudantes ao lidarem com conceitos relacionados à radioatividade. Em todas as questões, os teoremas-em-ação foram importantes para identificar como os estudantes mobilizaram seus conhecimentos prévios e os conceitos trabalhados em sala de aula, conforme proposto por Vergnaud (1990), ao destacar a importância dos esquemas e dos invariantes operatórios na resolução de situações-problema.

As respostas dadas pelos estudantes mostram uma progressão clara no entendimento em relação ao primeiro momento, no qual demonstraram apenas concepções básicas ou equivocadas sobre radioatividade. Embora algumas respostas ainda apresentem um caráter mais genérico, a maioria demonstra um avanço significativo, como mostrado na articulação de conceitos e aplicação correta de teoremas-em-ação.

De forma geral, a análise mostrou um avanço no entendimento e na aplicação dos conceitos de radioatividade, especialmente quando comparado ao primeiro momento da intervenção pedagógica. Inicialmente, as respostas eram limitadas e desconexas dos conceitos fundamentais, como decaimento radioativo, emissões radioativas e estabilidade nuclear. Após o estudo em sala de aula, os estudantes demonstraram maior capacidade de interpretar e articular esses conceitos dentro de contextos reais, o que se alinha à proposta de aprendizagem significativa defendida por Ausubel (2000) e ampliada por Moreira (2011), segundo a qual a aprendizagem ocorre quando o novo conhecimento se ancora de forma coerente a estruturas cognitivas já existentes.

5.3 ANÁLISE DO PASSO 7 – AVALIAÇÃO INDIVIDUAL SOMATIVA

Nessa seção, apresentamos a análise da avaliação somativa individual, aplicada no passo 7 da UEPS, cujo objetivo foi avaliar a evolução conceitual dos estudantes sobre o tema radioatividade. A prova consistiu em seis questões, das quais analisamos quatro, abrangendo diversos conceitos abordados durante a unidade. As questões permitiam que os estudantes expressassem sua compreensão de forma aberta, por meio de texto ou esquemas. No quadro 28, detalhamos a análise da primeira questão, que trata de isótopos e radioisótopos.

Quadro 28 – Análise dos invariantes operatórios para questão 2

Conceito-em-ação	Teorema-em-ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Isótopo e radioisótopo	T ₁ - Radioisótopo como elemento emissor de radiação e isótopo como elemento não emissor	Radioisótopo emite radiação, enquanto que o isótopo não emite – E1	3 estudantes
	T ₂ - Isótopo como variação de um elemento e radioisótopo como emissor radioativo	Isótopo variação de um elemento e radioisótopo é um isótopo radioativo – E3	5 estudantes
		Isótopo vai uma variação de um elemento com massas diferentes, é o radioisótopo vai ser o isótopo que emite radiação – E9	4 estudantes
	T ₃ - Isótopo como variação de um elemento e radioisótopo como elemento de núcleo instável	Isótopo é a variação de um elemento que possui o mesmo número de prótons diferenciando do outro elemento pelo número de nêutron. Já o radioisótopo além disso tudo também vai ter seu núcleo instável. - E16	12 estudantes
-	-	Não responderam	1 estudante

O quadro 28 apresenta como os estudantes compreenderam a diferença entre isótopos e radioisótopos, dois conceitos importantes para entender fenômenos relacionados à radioatividade. As respostas revelam que tivemos indícios de um possível domínio conceitual em relação as atividades anteriores, embora algumas interpretações ainda apresentem simplificações ou generalizações.

Nesta questão, três estudantes mobilizaram o teorema-em-ação: “Se o radioisótopo emite radiação e o isótopo não, então são diferentes”. Esse teorema é parcialmente verdadeiro. A formulação indica que os estudantes compreendem que os radioisótopos emitem radiação, o que está correto. No entanto, a afirmação de que

isótopos não emitem radiação generaliza de maneira equivocada, já que todo radioisótopo é um isótopo, mas nem todo isótopo é estável (Atkins, Jones e Laverman, 2018). A resposta revela um esquema conceitual ainda em refinamento, onde os invariantes operatórios acionam um critério de diferenciação baseado apenas na emissão de radiação, sem considerar a estrutura do núcleo atômico.

Cinco estudantes apresentaram respostas mais consistentes, ao definirem que “os isótopos são variações do mesmo elemento químico e que os radioisótopos são isótopos instáveis que emitem radiação”. Esse teorema-em-ação é verdadeiro e demonstra que os estudantes conseguiram mobilizar corretamente os conceitos de instabilidade nuclear, estrutura atômica e radioatividade. A distinção entre estrutura (mesmo número de prótons, número de nêutrons variável) e comportamento nuclear (estabilidade ou emissão de radiação) foi adequadamente estabelecida, indicando um campo conceitual articulado, conforme proposto por Vergnaud (1990) ao discutir a organização dos invariantes operatórios em situações de aprendizagem científica.

O grupo com doze estudantes, apresentou respostas ainda mais elaboradas, indicando que os isótopos compartilham o mesmo número atômico, mas diferem no número de nêutrons, e que os radioisótopos, por possuírem núcleos instáveis, passam por processos de decaimento radioativo com emissão de partículas. Este grupo demonstrou um domínio conceitual avançado, integrando múltiplas informações relevantes: estrutura do núcleo, instabilidade, e consequência física da desintegração (Halliday; Resnick; Walker, 2023). As respostas revelam representações mentais consolidadas sobre a estrutura atômica, coerentes com o modelo científico vigente, e validam o princípio de organização hierárquica de conceitos, como defendido por Ausubel (2003) e aprofundado por Moreira (2012).

Esses estudantes demonstraram esquemas conceituais amplos, organizando suas respostas com base em relações causais entre estrutura e comportamento radioativo, o que confirma um nível elevado de aprendizagem significativa. As relações entre conceito, representação e aplicação estão coerentes, conforme também discutido por trabalhos como o de Silva (2019e), que destacam a importância da articulação entre modelo atômico e fenômenos radioativos no Ensino Médio.

Apenas um estudante não respondeu à questão, número expressivamente inferior ao registrado nas etapas iniciais da sequência. Isso reforça o amadurecimento conceitual do grupo como um todo, validando o percurso formativo e o papel das intervenções didáticas bem estruturadas.

Na questão 3 os estudantes definiram radioatividade de acordo com seus conhecimentos adquiridos durante a unidade. No quadro 29, detalhamos a análise da terceira questão.

Quadro 29 – Análise dos invariantes operatórios para questão 3

Conceito-em-ação	Teorema-em-ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Transporte de Energia por Partículas e Ondas	T ₁ - Se um elemento é radioativo, logo ele libera energia	“Radioatividade é a liberação de energia por átomos” – E2	6 estudantes
Emissões radioativas; Estabilidade/instabilidade atômica	T ₂ - Se um átomo é instável, logo ele irá emitir partículas	“É a emissão de partículas quando o átomo é instável” – E5	5 estudantes
Emissões radioativas	T ₃ - Se um elemento é radioativo, logo ele irá emitir partículas alfa, beta e gama	“Um elemento que vai emitir as radiações alfas, beta e gama” – E7	4 estudantes
Decaimento radioativo; Estabilidade/instabilidade atômica	T ₄ - Se um elemento é radioativo, logo ele irá decair para se tornar estável	“Átomos que vão decair emitindo radiação para se tornar estáveis” – E9	4 estudantes
Transmutação de elementos	T ₅ - Se um elemento é radioativo, logo ele irá se transmutar em outro elemento.	“Radioatividade é uma radiação que vai fazendo os átomos mudarem de elemento” – E11	4 estudantes
Estabilidade/instabilidade atômica; emissões radioativas; transmutação de elementos	T ₂ - Se um átomo é instável, logo ele irá emitir partículas. T ₄ - Se um elemento é radioativo, logo ele irá decair para se tornar estável.	“Radioatividade vai acontecer quando eu tiver núcleos de átomos instáveis, aí como a natureza sempre procurar a estabilidade, o átomo vai emitir partículas radioativas, ir mudando seu núcleo cada vez que emite uma partícula até se tornar estável.” – E15	2 estudantes
-	-	Não responderam	1 estudante

No quadro 29, observamos um panorama das justificativas dadas pelos estudantes após uma sequência de atividades relacionadas à radioatividade. Ao comparar essas respostas com aquelas registradas nas primeiras atividades, é possível perceber um avanço significativo na forma como os estudantes passaram a organizar e articular os conceitos envolvidos.

No primeiro teorema identificado (T1), mobilizado por seis estudantes, a radioatividade foi descrita como liberação de energia pelos átomos. A justificativa de E2, "Radioatividade é a liberação de energia por átomos", sinaliza um deslocamento importante em relação à visão inicial dos estudantes, que muitas vezes reduziam a

radioatividade a um conceito vago. Aqui, observa-se a mobilização do conceito de transporte de energia por partículas ou ondas, coerente com os fundamentos da Física Moderna (Halliday, Resnick e Walker 2023), o que permite classificar esse teorema-em-ação como verdadeiro, embora formulado de maneira ainda simplificada.

No teorema T2, a ideia de que um átomo instável emitiria partículas foi acionada por cinco estudantes. A menção direta à instabilidade nuclear aparece, por exemplo, na justificativa de E5: "É a emissão de partículas quando o átomo é instável". Essa formulação demonstra compreensão de que o comportamento radioativo é condicionado pela estrutura nuclear do elemento, o que indica um esquema conceitual mais robusto (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

Quatro estudantes acionaram o teorema T3 ao identificarem os tipos de radiação emitidos. A justificativa de E7, "Um elemento que vai emitir as radiações alfa, beta e gama", mostra familiaridade com os tipos de radiação e a vinculação ao comportamento de elementos instáveis. Isso se alinha à noção de aprendizagem significativa de Ausubel (2003). O teorema T4, que vincula o decaimento à busca por estabilidade nuclear, também foi ativado por quatro estudantes. Na resposta de E9, por exemplo, afirma-se: "Átomos que vão decair emitindo radiação para se tornarem estáveis". Essa explicação revela compreensão do modelo físico de decaimento radioativo, baseado na instabilidade do núcleo e na emissão de radiação como processo de estabilização (Atkins, Jones e Laverman, 2018).

O teorema T5, relacionado à transmutação de elementos, também foi mobilizado por quatro estudantes. A justificativa de E11, "Radioatividade é uma radiação que vai fazendo os átomos mudarem de elemento", demonstra que o estudante compreendeu que o decaimento pode alterar o número atômico de um elemento, gerando outro. Esse entendimento é compatível com o conceito de transformações nucleares (Halliday; Resnick; Walker, 2023).

Por fim, dois estudantes apresentaram uma compreensão mais abrangente e articulada do fenômeno. A resposta de E15 "Radioatividade vai acontecer quando eu tiver núcleos de átomos instáveis, aí como a natureza sempre procurar a estabilidade, o átomo vai emitir partículas radioativas, ir mudando seu núcleo cada vez que emite uma partícula até se tornar estável", ativa simultaneamente mais de um teorema-em-ação, integrando instabilidade nuclear, emissões radioativas, decaimento e transmutação de elementos. Trata-se de uma representação de maior nível conceitual, que evidencia a organização de esquemas mentais mais complexos (Vergnaud, 1990). Apenas um

estudante não respondeu à questão, o que representa uma significativa redução nas ausências, indicando maior confiança conceitual e participação dos estudantes nas etapas finais da sequência.

A questão 4 abordava o conceito de decaimento radioativo como tema central. Para auxiliar os estudantes, foi estabelecida uma comparação com o experimento realizado durante a unidade, que explorava especificamente o conceito de decaimento e série radioativa. No quadro 30, detalhamos a análise da quarta questão.

Quadro 30 – Análise dos invariantes operatórios para questão 4

Conceito-em-ação	Teorema-em-ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
Desintegração radioativa	T ₁ - Se o elemento está sofrendo decaimento, logo ele perderá matéria	“Acontece quando o elemento vai perdendo matéria com o tempo até sumir” – E2	5 estudantes
Desintegração radioativa	T ₁ - Se o elemento está sofrendo decaimento, logo ele perderá matéria	“Acontece quando o elemento é radioativo aí ele vai perdendo massa com o tempo para deixar de ser radioativo” – E6	5 estudantes
Estabilidade/Instabilidade atômica; decaimento radioativo; desintegração radioativa	T ₂ - Se o átomo é instável, ele irá decair e por consequência perder massa devido a desintegração radioativa	“Os dados estavam representando átomos instáveis que iam decaindo (perdendo massa com o tempo) devido a desintegração radioativa” – E8	4 estudantes
Emissão radioativa; desintegração radioativa	T ₃ - Se o elemento emite radiação, logo ele perderá massa	“Quando um elemento emite radiação ele vai perdendo massa também” – E11	7 estudantes
Estabilidade/Instabilidade atômica; Emissão radioativa; desintegração radioativa	T ₄ – Se um átomo é instável, ele irá decair para se tornar estável. T ₅ – Se um elemento está emitindo partículas radioativas, logo ele pode perder massa como no caso da alfa.	“Bom... quando os átomos estão instáveis, eles vão decaindo até se tornar estáveis, para isso o elemento emite as partículas radioativas, aí como no caso da alfa, o elemento perde massa, era isso que os dados estavam representando, a perda de massa com o tempo” – E17	2 estudantes
-	-	Não responderam	2 estudantes

O primeiro grupo, formado por 10 estudantes, mobilizou o teorema-em-ação T1: “Se o elemento está sofrendo decaimento, então ele perderá massa”. As justificativas incluem afirmações como a de E2: “Acontece quando o elemento vai perdendo matéria com o tempo até sumir”, e de E6: “Acontece quando o elemento é radioativo, aí ele vai perdendo massa com o tempo para deixar de ser radioativo”. Essas respostas demonstram uma compreensão cada vez mais alinhada ao processo físico em questão. Os estudantes articulam o decaimento como uma sequência de transformações

estruturais no núcleo atômico, que resultam na redução da massa (Halliday; Resnick; Walker, 2023).

O segundo grupo, composto por 4 estudantes, mobilizou o teorema-em-ação T2: “Se o átomo é instável, ele irá decair e perder massa por consequência”. A resposta de E8 sintetiza essa compreensão: “Os dados estavam representando átomos instáveis que iam decaindo (perdendo massa com o tempo) devido à desintegração radioativa”. Ao relacionar instabilidade à desintegração, o estudante expressa um raciocínio causal, indo além de uma simples descrição do fenômeno e aproximando-se da compreensão conceitual cientificamente aceita (Atkins, Jones e Laverman, 2018,).

Sete estudantes mobilizaram o teorema T3: “Se o elemento emite radiação, então ele perderá massa”. A justificativa de E11 exemplifica esse raciocínio: “Quando um elemento emite radiação, ele vai perdendo massa também”. Essa resposta mostra que os estudantes estão compreendendo que a radiação emitida não é apenas um efeito externo, mas está diretamente relacionada a transformações internas no núcleo do átomo, como a emissão de partículas (alfa, beta) que implicam perda de massa (Halliday; Resnick; Walker, 2023).

Um grupo final, composto por dois estudantes, apresentou respostas de maior nível conceitual ao integrar diferentes elementos em uma mesma justificativa. O estudante E17 declarou: “Bom... quando os átomos estão instáveis, eles vão decaindo até se tornar estáveis, para isso o elemento emite as partículas radioativas, então no caso da alfa, o elemento perde massa, aí isso que os dados estavam representando, a perda de massa com o tempo”. Essa resposta ativa simultaneamente os teoremas T2 e T3 e demonstra uma articulação conceitual bastante consistente, envolvendo instabilidade, decaimento, emissão de partículas e estabilização. De acordo com Vergnaud (1990), a integração desses elementos indica a consolidação de esquemas conceituais mais complexos. Apenas dois estudantes não responderam à questão, o que é um número bastante pequeno e que mostra que a maior parte da turma se sentiu segura para tentar explicar o fenômeno, mesmo que com diferentes graus de complexidade.

A questão 5 abordava o conceito de meia vida como tema central. No quadro 31, detalhamos a análise da terceira questão feita de acordo com as respostas dos estudantes que foram adquiridas durante a unidade.

Quadro 31 – Análise dos invariantes operatórios para questão 5

Conceito-em-ação	Teorema-em- ação	Exemplo de justificativa dada pelos estudantes	Frequência
------------------	------------------	--	------------

Meia vida	T_1 - Meia vida como tempo necessário para que metade dos átomos presentes em uma amostra radioativa desintegre-se	É o tempo para chegar na metade da massa	12 estudantes
Meia vida	T_1 - Meia vida como tempo necessário para que metade dos átomos presentes em uma amostra radioativa desintegre-se	É o tempo para os átomos de desintegrarem pela metade	5 estudantes
Meia vida	T_1 - Meia vida como tempo necessário para que metade dos átomos presentes em uma amostra radioativa desintegre-se	É o tempo para que a matéria se reduza pela metade da inicial	7 estudantes
-	-	Não responderam	1 estudante

Diferente das primeiras atividades, em que as respostas giravam em torno de “a bateria do celular pela metade” ou ideias vagas como “quando a radiação diminui”, aqui a maioria dos estudantes demonstrou compreender que meia-vida está relacionada a um processo contínuo e mensurável de transformação ao longo do tempo, envolvendo a redução de uma amostra radioativa à metade.

O teorema-em-ação dominante em todas as respostas foi o T_1 – Meia-vida como o tempo necessário para que metade dos átomos presentes em uma amostra radioativa se desintegrem, foi o conceito que mais apareceu nas justificativas, ainda que formulado com diferentes palavras e enfoques.

O primeiro grupo, composto por 12 estudantes, afirmou que meia-vida é "o tempo para chegar na metade da massa" (E1). Embora a meia-vida não se refira diretamente à massa, e sim ao número de núcleos instáveis, essa justificativa mostra um entendimento proporcional correto. Trata-se de um invariante operatório funcional, mesmo que ainda expresso com termos imprecisos, pois mostra que os estudantes compreenderam a ideia de que o material radioativo é reduzido pela metade em intervalos regulares. Conforme destaca Moreira (2012), mesmo respostas com vocabulário informal podem indicar construções conceituais significativas quando os conceitos-em-ação ativados são coerentes com o conhecimento científico.

No segundo grupo, com cinco estudantes, a formulação foi ainda mais precisa: "É o tempo para os átomos se desintegrarem pela metade" (E2). Aqui, os estudantes reconhecem o papel da desintegração atômica no processo de meia-vida, demonstrando uma representação mais próxima do modelo físico, o que indica o acionamento de esquemas mais consolidados (Vergnaud, 1990). Essa resposta evidencia que os

estudantes estão migrando de uma visão macroscópica para uma interpretação submicroscópica do fenômeno, fundamental para a aprendizagem significativa (Ausubel, 2003).

Um terceiro grupo, com sete estudantes, afirmou que meia-vida é "o tempo para que a matéria se reduza pela metade da inicial" (E3). O termo "matéria" é amplo, mas a estrutura conceitual da resposta permanece válida. Esses estudantes estão desenvolvendo um campo conceitual que reconhece a previsibilidade temporal do decaimento radioativo, ainda que não dominem completamente o vocabulário científico. Segundo Moreira (2012), esse tipo de formulação reflete uma fase de transição no processo de aquisição conceitual, em que os esquemas ainda estão em processo de refinamento.

Apenas um estudante não respondeu, o que reforça a ideia de que a maior parte da turma se sentiu capaz de elaborar uma explicação, algo que contrasta com as primeiras etapas da unidade, onde o número de respostas em branco era consideravelmente maior.

5.4 POSSÍVEL DOMÍNIO DO CAMPO CONCEITUAL

Ao analisar o conjunto de respostas dadas pelos estudantes ao longo das atividades propostas, é possível identificar uma evolução clara e significativa no campo conceitual relacionado à radioatividade. No início da sequência, as respostas eram marcadas predominantemente por afirmações vagas, analogias cotidianas, ideias do senso comum e até mesmo equívocos conceituais. Muitos estudantes associavam termos como “radiação”, “decaimento” e “meia-vida” a doenças, bombas nucleares, energia perigosa ou efeitos destrutivos, o que evidencia uma compreensão fragmentada e, em grande parte, influenciada por representações midiáticas ou culturais (Viana & Bastista, 2015).

Essas concepções iniciais são esperadas e descritas por Vergnaud (1990) como: o estudante opera inicialmente com invariantes operatórios parciais, construídos a partir de vivências e referências externas à ciência formal. Por isso, é comum que os primeiros teoremas-em-ação ativados estejam desconectados dos modelos explicativos científicos e baseados apenas em associações perceptivas ou emotivas, como “raios que matam”, “coisa tóxica” ou “algo invisível que causa doença”.

Com o avanço das atividades, especialmente aquelas que envolveram atividades práticas, leitura de notícias e análise de gráficos, foi possível perceber uma mudança na forma como os estudantes passaram a justificar suas respostas. A mobilização de conceitos como instabilidade nuclear, emissão de partículas, decaimento, meia-vida e transmutação passou a ser cada vez mais frequente e articulada. Os estudantes passaram a integrar essas noções em explicações mais elaboradas e próximas da linguagem científica, o que indica uma reorganização progressiva da estrutura conceitual (Ausubel, 2003; Moreira, 2012; Vergnaud, 1990).

Esse processo de transformação nas ideias dos estudantes está alinhado ao que Mortimer (2000) caracteriza como mudança conceitual progressiva, um movimento no qual os estudantes reorganizam ou substituem seus esquemas explicativos anteriores à medida que vivenciam novas experiências de aprendizagem, tornando suas compreensões mais próximas e coerentes com os modelos científicos. Estudos como os de Scheffler e Del Pino (2013) também mostram que a exposição a contextos reais e atividades interdisciplinares favorece a evolução conceitual em temas da Física Moderna, como a radioatividade.

Ao final da sequência, foi possível observar que muitos estudantes deixaram de lado explicações baseadas em metáforas vagas ou comparações do cotidiano e passaram a construir raciocínios causais, como “átomos instáveis decaem para se tornarem estáveis, emitindo partículas e perdendo massa”, ou “meia-vida é o tempo necessário para metade dos átomos se desintegrarem”.

Além disso, houve uma redução significativa nas respostas em branco. Nas atividades iniciais, o número de estudantes que deixavam de responder era elevado, o que indicava falta de familiaridade com o tema. Nas últimas etapas, porém, esse número diminuiu, mostrando que os estudantes passaram a se sentir mais confiantes para explicar os fenômenos, ainda que com níveis variados de complexidade. Esse dado corrobora o argumento de que a aprendizagem ocorre de forma gradativa, por meio da ampliação dos esquemas mentais e da reestruturação dos significados construídos ao longo das experiências escolares (Corrêa, 2017; Moreira, 2012).

A presença de teoremas-em-ação mais complexos e coerentes nas fases finais da sequência também evidencia o desenvolvimento de aprendizagens significativas. Segundo Ausubel (2003), quando o novo conteúdo consegue se ancorar em conhecimentos prévios relevantes, há maior chance de ocorrer uma aprendizagem estável e duradoura. No caso desta sequência, os saberes prévios dos estudantes, ainda

que inicialmente limitados, foram mobilizados como ponto de partida para a construção de novos significados, em uma perspectiva compatível com o que Moreira (2011) defende ao afirmar que o ensino deve partir do que o estudante já sabe, e não do que ele ainda não aprendeu.

Os resultados obtidos evidenciam a importância de práticas pedagógicas que reconheçam e valorizem os conhecimentos prévios dos estudantes, favorecendo o diálogo entre os saberes do cotidiano e os conhecimentos científicos. Ao oferecerem experiências de aprendizagem significativas, contextualizadas e integradoras, essas práticas criam condições para uma aprendizagem mais profunda e conectada com a realidade dos estudantes (Moreira, 2012; Mortimer, 2000; Vygotski, 2001). Quando planejadas, contribuem não apenas para o desenvolvimento do domínio conceitual, mas também para a formação de sujeitos capazes de interpretar e explicar o mundo de maneira crítica e fundamentada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, apresento algumas considerações sobre o projeto piloto. Embora tenha revelado resultados promissores, o projeto enfrentou desafios significativos que impactaram diretamente sua execução. A primeira dificuldade foi a necessidade de adaptação a uma sala de aula da qual eu não era professor regente. A troca de professor demandou um período de ajustamento tanto para os estudantes quanto para mim, o que acabou influenciando o andamento das atividades.

A proximidade do final do ano letivo, marcada pelo aumento das faltas e pela diminuição da participação dos estudantes, representou um desafio adicional. A perda de aulas e a falta de comprometimento de alguns estudantes dificultaram a implementação completa das atividades propostas. A sensação de que a aprovação já estava garantida e a proximidade das férias contribuíram ainda mais para a desmotivação dos estudantes.

Outro obstáculo enfrentado foi a necessidade constante de readequação do planejamento. Frequentemente, atividades inicialmente previstas para duas aulas exigiam mais tempo para serem desenvolvidas de forma satisfatória. Além disso, o cronograma foi comprometido pela elevada frequência de cancelamentos de aulas devido a fatores externos, como avaliações externas, eventos escolares e feriados. Essas interrupções afetaram a continuidade do trabalho e dificultaram a manutenção do ritmo das atividades. Em síntese, os desafios enfrentados no projeto piloto, relacionados principalmente a participação dos estudantes e às constantes interrupções, evidenciam a importância de considerar tais fatores no planejamento de futuras implementações.

Após a reformulação da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), com base nas aprendizagens do projeto piloto, iniciamos uma nova etapa de aplicação. Apesar dos ajustes realizados, alguns desafios persistiram. Um dos principais foi a necessidade de um tempo maior do que o previsto para a execução das atividades. Essa demanda pode ser explicada, em parte, pelo fato de trabalharmos com estudantes do primeiro ano do Ensino Médio, que ainda estão em processo de adaptação a essa etapa da escolarização e desenvolvendo habilidades para lidar com estudos mais complexos. A complexidade dos temas abordados e a necessidade de construir conhecimentos de forma gradativa também contribuíram para esse ritmo mais lento.

Por outro lado, é importante destacar o grande interesse demonstrado pelos estudantes diante dos temas propostos na UEPS. Houve uma participação ativa, que se estendeu para além das aulas, com discussões e questionamentos motivados, muitas vezes, por referências a filmes e séries com temáticas científicas. Essa participação indica o potencial das atividades da UEPS para despertar a curiosidade dos estudantes e favorecer uma aprendizagem mais significativa.

Dessa forma, a reconstrução da UEPS e sua subsequente implementação no primeiro semestre de 2024 acarretaram em um deslocamento do cronograma inicial do projeto. As etapas de estudo, construção e análise dos dados, inicialmente previstas para esse período, foram adiadas a fim de garantir a adequação ao novo cronograma e assegurar a qualidade na coleta dos dados.

Durante a revisão da literatura, identificamos a escassez de estudos que investiguem a construção do conhecimento sobre radioatividade em estudantes do Ensino Médio sob a perspectiva da Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud. Além disso, a utilização da UEPS como metodologia de ensino nesse contexto específico também se mostrou pouco explorada. Diante desse cenário, este estudo contribui de forma relevante para o campo da Educação em Ciências.

Durante o planejamento da pesquisa, uma das principais preocupações foi delimitar os conceitos a serem trabalhados na unidade. Essa delimitação mostrou-se essencial na implementação, considerando que o tema da radioatividade é amplo e pode ser abordado sob diferentes perspectivas. Sem essa organização, haveria o risco de dispersão de foco, comprometendo a execução da UEPS. Assim, optamos por uma abordagem mais direcionada e coerente com os objetivos educacionais estabelecidos nos documentos oficiais.

A análise dos conhecimentos prévios dos estudantes sobre radioatividade revelou um cenário desafiador. Observamos que a maioria apresentava dificuldades em estabelecer conexões mais profundas entre os conceitos, limitando-se a associações superficiais ou isoladas. A predominância de respostas mecânicas, ou mesmo a ausência de respostas, apontou para a necessidade de um trabalho mais estruturado para a construção de uma compreensão conceitual consistente sobre o tema.

Outro ponto relevante observado foi a presença de concepções equivocadas sobre radioatividade, frequentemente associadas a bombas atômicas, riscos de contaminação, câncer e ao uso na medicina. Essas ideias são amplamente influenciadas por representações midiáticas, que tendem a enfatizar aspectos sensacionalistas. Os

dados dessa etapa inicial foram fundamentais para orientar os passos seguintes da UEPS, no sentido de desenvolver habilidades cognitivas e promover a superação dessas concepções alternativas.

A análise dos dados evidenciou que, ao longo da sequência didática, os estudantes avançaram de explicações fundamentadas no senso comum para construções conceituais mais consistentes, mobilizando invariantes operatórios que revelaram diferentes níveis de apropriação conceitual. As situações-problema propostas mostraram-se fundamentais nesse processo, pois permitiram aos estudantes confrontar suas concepções iniciais, reorganizar seus esquemas de pensamento e elaborar raciocínios causais mais estruturados sobre temas como átomo, núcleo, partículas subatômicas, meia-vida e decaimento radioativo. Esse movimento indica que a UEPS contribuiu para uma aprendizagem significativa, nos termos da Teoria dos Campos Conceituais, uma vez que promoveu a articulação de diferentes conceitos dentro do campo da radioatividade.

Os resultados obtidos permitem também destacar importantes contribuições para o Ensino de Ciências. Inicialmente, mostram a viabilidade da utilização de UEPS no Ensino Médio como estratégia metodológica para abordar conteúdos de Física Moderna, onde são pouco explorados nos currículos. Em segundo lugar, a proposta reforça a importância do uso de situações-problema contextualizadas para favorecer a mobilização de invariantes operatórios e estimular a reflexão dos estudantes.

Apesar disso, é importante reconhecer que apenas uma parte do potencial do tema foi explorada. Tópicos como fissão e fusão nuclear, impactos ambientais e aplicações na física médica poderiam, por si só, constituir unidades de ensino específicas. Esses conteúdos permanecem como possibilidades para futuras investigações e práticas pedagógicas, dada sua complexidade e relevância para a formação científica e cidadã dos estudantes.

7. REFERÊNCIAS

ALBERTI, T.R.R. **Inserção de tópicos de física moderna e contemporânea no ensino de física: elaboração de uma unidade didática com foco em nanociências e nanotecnologia**. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Mestrado Profissional em Formação Científica, Educacional e Tecnológica – PPGFCET, 2016.

ANTISZKO, T. R. Et al. **Produto educacional para o ensino de radioatividade por meio de uma sequência didática em uma abordagem ciência, tecnologia e sociedade (cts)**. Dissertação, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa - PR, 2016.

ANTISZKO, T. R.; SAUER, E. Utilização do programa MAXqda10 na investigação de subsunções de estudantes de nível médio a respeito do tema radioatividade e de sua relação com a ciência, tecnologia e sociedade (CTS). **Ensino & Pesquisa**, v. 16, n 1, p.173 – 189, 2018.

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

AUSUBEL, D. P. **Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva**. Paralelo editora, lda. Lisboa, PT, 2000.

AUSUBEL, D. P. **Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva**. Portugal: Paralelo Editora, 2003.

ATKINS, Peter; LAVERMAN, Leroy; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

BARCELLOS, L. R.; MOREIRA, M. A. A inserção dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: obstáculos e possibilidades à luz da Teoria da Aprendizagem Significativa. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 2, 2020.

BARRACCO, A. C.. **Ensino de Física de Partículas na Educação Básica: sequências didáticas e compreensão conceitual**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) — Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/235231>.

BATISTA, C. A. S.; SIQUEIRA, M. A inserção da Física Moderna e Contemporânea em ambientes reais de sala de aula: uma sequência de ensino aprendizagem sobre radioatividade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, V.34, n 3, p.880-902, dez. 2017.

BERTTI, C. V. B. Et al. Proposta de um experimento para a compressão da meia-vida radioativa com o uso de poliedros físicos e virtuais. **Revista de enseñanza de la física**. Vol. 35, n. 1 | ENERO-JUNIO 2023 | PP. 109-118.

BIGNARDI, C.; GIBIN, G. B.. Análise sobre modelos atômicos em Livros Didáticos de Química segundo a História e Filosofia da Ciência. **Caderno Amazonense de Pesquisa em Ensino de Ciências e Matemática**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. e202105, 2021. DOI: 10.52894/CECi.2763-6623.v1.n1.e202105. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/ceci/article/view/9073>.

BOHR, N. On the Constitution of Atoms and Molecules. **Philosophical Magazine**, v. 26, n. 151, p. 1–25, 1913.

BOCH, L. B. **Ensino de Física nuclear com enfoque CTS por meio da experimentação**. 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Ciências Naturais e Matemática) – Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, PR, 2018.

BOFF, C.A. Et al. Práticas experimentais no ensino de Física nuclear utilizando material de baixo custo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.34, n.1, p.236 – 247, abr. 2017.

BORTOLI, L. Et al. Uma experiência didática com unidades de ensino potencialmente significativas para o tópico radiações ionizantes. **Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista**, Vol. 9, n. 3. Set./Dez. 2019.

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

CALHEIRO, L. B. **Inserção de tópicos de física de partículas de forma integrada aos conteúdos tradicionalmente abordados no ensino médio**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

CALHEIRO, L.B. **As Representações Sociais da Radiação no Contexto do Ensino Médio e a sua articulação com os Campos Conceituais de Vergnaud**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PORTO ALEGRE, 2018.

CORTEZ, J. **O LEGADO DE MADAME CURIE: Uma abordagem CTS para o Ensino da Radioatividade**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. UFRGS, Porto Alegre - RS, 2014.

CORTEZ, J. ; OLIVEIRA, R. P. O ensino da radioatividade nos livros de física do PNLD e o enfoque CTS. **Revista Ciência & Ideais**, vol. 11, n.3 – setembro/dezembro 2020.

CORREIA, O. **Radiação e suas aplicações no cotidiano**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura Plena em Física) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

CORRÊA, C.R.G.L. A relação entre desenvolvimento humano e aprendizagem: perspectivas teóricas. **Psicologia Escolar e Educacional**, SP. Volume 21, Número 3, Setembro/Dezembro de 2017: 379-386.

CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa: método qualitativo, quantitativo e misto**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

CUNHA, M. I. ; FERREIRA, M. S. A teoria dos campos conceituais e o ensino de ciências: uma revisão de literatura (2008–2018). **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 20, p. 1–28, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/19358>. Acesso em: 22 jul. 2025.

DA SILVA, M. C. **Ensino de radiação ionizante utilizando materiais de baixo custo: contador Geiger, Weblab-geiger e simuladores**. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, 2019.

DA SILVA, F. F. R. **Radioatividade e história das ciências como percursos transdisciplinares: desafios e possibilidades**. Dissertação, Universidade Federal Fluminense, Niterói- RJ, 2020.

DA SILVA, D. P. **Espectro eletromagnético: um material didático para o ensino das radiações ionizantes e não ionizantes para prática inclusiva de estudantes com deficiência visual**. Dissertação, Instituto Federal do Rio de Janeiro, Nilópolis - RJ 2023.

DELGADO, Patrick Luiz Guevara. **O GPS a partir da aprendizagem baseada em projetos na explicitação dos invariantes operatórios relacionados ao campo conceitual da relatividade**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/8574>.

DE LUCENA, E. A., et al. Radiação ionizante, energia nuclear e proteção radiológica para a escola. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, 2017, vol. 5, no 1.

DE LIRA, E. V. **Os Benefícios do Uso da Energia Nuclear**. TCC, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, 2015.

DIAS, R. A. S. **Radioatividade: um módulo didático para o ensino médio**. 2013. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física e de Matemática) – Centro Universitário Franciscano (Universidade Franciscana), Santa Maria, RS, 2013.

DORSCH, G. C.; GUIO, T. C. C. Física de partículas no ensino médio – Parte II: Física Nuclear. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, 2023. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0067. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Rzb7rZ8G85QT9Cy73ffYKQS/>.

FAGUNDES, J. V. **Energia nuclear radioativa: uma análise dos obstáculos epistemológicos**. Dissertação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina – PR, 2019.

FERNANDEZ, J. V. M.; Et al. Uma nova estratégia para o ensino de Física nuclear e radioatividade para o novo ensino médio: auto aprendizagem guiada por aplicativo web. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 43, e20210295 (2021).

FERNANDES, J.A.S.; FASSARELLA, L.S. Contribuições da metodologia Resolução de Problemas ao ensino-aprendizagem de divisibilidade: um estudo de caso. **Educação Matemática Debate**, Montes Claros, v. 4, n. 2, p. 334–353, 2020. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/6001/600162805023>. Acesso em: 22 jul. 2025.

FERREIRA, L. H. L. **Ensino de Física: Radiações Ionizantes e suas aplicações no contexto do ensino de Ondas**. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Set.2021.

FERREIRA, R.R. A radioatividade no ensino médio na perspectiva da Pedagogia Histórico-Crítica: o ensino de química em foco. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Campo Mourão, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24079>

FIUZA, G. S. **Radiações ionizantes e radiações não ionizantes no ensino médio**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) — Instituto de Estatística, Matemática e Física, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, 2016

FILHO, O.L.S.; FERREIRA, M. Modelo teórico para levantamento e organização de subsunçores no âmbito da Aprendizagem Significativa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 44, 2022.

PEROVANO, A.P. Quando professores do Ensino Fundamental elaboram situações-problema envolvendo as estruturas multiplicativas: que situações priorizar? **Educação Matemática Debate**, Montes Claros, v. 4, n. 2, p. X–Y, 2020. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/6001/600166633002/html>. Acesso em: 22 jul. 2025.

GONZATTO, E. F. **Raios-x e Radioterapia: uma oficina temática para abordar conceitos de radiações e radioatividade no ensino médio na perspectiva da contextualização**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. Dez. 2020.

GOMES, W. R.; DA SILVA, W. G. dos S.; CORREA, I. L. Meios Alternativos de Produção de Energia Elétrica. **Bolsista de Valor**, 2012, vol. 2, p. 205-214. 2012

GOMES, T. G. **Uma história da radioatividade para a Escola Básica: desafios e propostas**. Dissertação, Programa Interunidades em Ensino de Ciências. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2019.

GOMBRAGE, R; LONDERO, L. Percepções de estudantes sobre usinas nucleares e o resíduo radioativo. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, 17(2).), pp. 286-299. 2022. DOI <https://doi.org/10.14483/23464712.17810>

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Além da detecção de modelos mentais dos estudantes: uma proposta representacional integradora. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 31–53, mar.2002. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/568>.

HALLIDAY, David; WALKER, Jearl; RESNICK, Robert. **Fundamentos da Física - Óptica e Física Moderna**. v. 4. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

MACHADO, M. A.; CRUZ, F. A. O. Estudo do Decaimento Radioativo com o uso da plataforma PhET: uma proposta para EAD. **EaD em foco**, V10, e925, 2020.

MARTINS FONTES, D. T.; RODRIGUES, A.M.A Física Moderna e Contemporânea nas perspectivas CTSA e História da Ciência nos livros didáticos de física. **Rev. Eletrônica Pesquiseduca**. Santos, Volume 11, número 25, p.390-412,set.-dez. 2019.

MESSIAS, M.A.V.; BRANDMBERG, J.C. Um olhar sobre a psicologia da aprendizagem em matemática no contexto de teorias cognitivas do pensamento matemático avançado. Revista REAMEC, Cuiabá/MT, v. 11, n. 1, e23091, jan./dez., 2023

MORAES, D. V. **Estudo de radiações ionizantes e não ionizantes utilizando como facilitador a câmara de nuvens caseira**. Dissertação, programa de pós graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. UFMT, Barra do Garças-MT, 2020.

MONTEIRO, M. D. S.; SILVA, S. A. Sequência de ensino e aprendizagem sobre radioatividade pautada na perspectiva Ciência – Tecnologia – Sociedade (CTS). **Dialogia**, São Paulo, n.36, p. 595 – 609, set./dez. 2020.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem Significativa**. 5. ed. Brasília: Ed. da UnB, 1999.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 7–29, jan./abr. 2002. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID9/v7_n1_a2002.pdf. Acesso em: 22 jul. 2025.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa crítica**. Porto Alegre, 2005.

MOREIRA, Marco Antônio. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. **Revista Brasileira de Educação**, v. 10, n. 29, p. 5-20, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-24782005000100002>. Acesso em: 06 abr. 2025.

MOREIRA, M. A. **Unidades de ensino potencialmente significativas – UEPS**, Aprendizagem Significativa em Revista, v 1, n. 2, 2011.

MOREIRA, Marco Antônio. **Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel**. Brasília: Ministério da Educação, 2011. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~moreira/TA_Ausubel_MEC.pdf. Acesso em: 06 abr. 2025.

MOREIRA, M.A. Organizadores Prévios e Aprendizagem Significativa. **Revista Chilena de Educación Científica**. Vol. 7, Nº. 2, 2008 , pp. 23-30. Revisado em 2012.

MOREIRA, M. A. Desafios no ensino da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 43, suppl. 1, e20200451 (2021).

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

MORTIMER, E. F. **Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências**. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 383 p. Disponível em: <https://archive.org/details/linguagemformac0000mort>.

NAUJORKS, A. C. **A Física das Radiações Aplicada à Medicina: Uma Proposta Didática para Inserção de Física Moderna e Contemporânea na Educação Básica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2022. Disponível em: <https://infi.ufms.br/tcc/fisica-licenciatura/>

NASCIMENTO, J. P.A. **Física Moderna no Ensino Médio: adaptação de uma sequência didática para ensino de radiação e radioatividade.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47925>. Acesso em: 22 jul. 2025.

NICOLETE, P. C.; SANTOS, A. C.; TAROUCO, L. M. R.; SILVA, M. A. M. Teoria dos campos conceituais como instrumento para o planejamento e construção de recursos tecnológicos para o ensino de ciências. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, Araraquara, v. 16, n. 4, p. 2560–2577, out./dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.fclar.unesp.br/iberoamericana/article/view/13435>. Acesso em: 22 jul. 2025.

OLIVEIRA, F. M. **Desenvolvimento de recursos e estratégias para o ensino/aprendizagem de radioatividade.** Dissertação, Pós-graduação em Ensino de Ciências da Natureza da Universidade Federal Fluminense – Mestrado Profissional. Niterói, 2016.

OLIVEIRA, V. P.; Et al. Sequência didática baseada no arco de Maguerez a partir do diagnóstico sobre o tema radioatividade. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**, Mossoró, v.6, n.18, outubro/2020.

OLIVEIRA, G. S. B.; CAMPOS, L. Ensino de Física usando situações-problema sobre o uso de radiações ionizantes para o diagnóstico do câncer de mama. **Scientia Plena**. Vol. 18, num. 8. 2022.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.5, n.1, p. 23-48, 2000.

PAPAGEORGIOU, George; MARKOS, Angelos; ZARKADIS, Nikolaos. Students’ representations of the atomic structure – the effect of some individual differences in particular task contexts. **Chemistry Education Research and Practice**, Cambridge (UK), v. 17, p. 209–219, 2016. DOI: 10.1039/C5RP00201J. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C5RP00201J>.

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, [S.l.], v. 372, n. 71, p. 1–9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 21 jul. 2025.

PANTOJA, G. C. F. O conceito de representação na perspectiva da Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 28, n. 3, p. 1-23, dez. 2023. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/3217>.

PEREIRA, P.N.; GUERINI, S. C.; SÁ-SILVA, J. R. Os conteúdos de física moderna em livros didáticos de física do Ensino Médio. **Debates em Educação**, Vol. 11 n°24. ago. 2019.

PINHEIRO, D. A. M. **Ensino de Física das radiações ionizantes: do senso comum ao conhecimento científico**. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Centro, Manaus, AM, 2016.

PRIGOL, E. L.; BEHRENS, M. A. Teoria Fundamentada: metodologia aplicada na pesquisa em educação. **Educação & Realidade**, Porto Alegre, v. 44, n. 3, e84611, 2019.

PRISMA Group. **Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses**. (s.l.): University of Ottawa/Oxford University, 2020.

RAZUCK, F. B.; PESSANHA, M. A. Wilson chamber – an experiment proposal using low-cost material for teaching radioactivity. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1A (Supl.), 2020. DOI: 10.15392/bjrs.v8i1A.992

RAMIRES, J.R. Heróis em Quadrinhos: radioatividade a partir de uma perspectiva interdisciplinar em um subprojeto PIBID. **Kiri-kerê: pesquisa em ensino**, n.14, dez. 2022.

RESQUETTI, S. O. **Uma sequência didática para o ensino da radioatividade no nível médio, com enfoque na história e filosofia da ciência e no movimento CTS**. 2013. Dissertação (Doutorado em Educação para a Ciência e a Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2013.

ROCHA, J. A.; SILVA, A.C.T. Compreensões de estudantes de nível médio sobre descoberta: Discussões em torno do episódio da descoberta da radioatividade em uma sequência de ensino e aprendizagem. **Investigações em Ensino de Ciências – V24** (2), pp.56-71, 2019.

RUTHERFORD, E. The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. **Philosophical Magazine**, v. 21, n. 125, p. 669–688, 1911.

SALES, M. F. Et al. Jornada radioativa: um jogo de tabuleiro para o ensino de radioatividade. **Revista Eletrônica Ludus Scientiae**, Foz do Iguaçu, v. 4, n. 2, p.74-87, ago./dez.,2020

SANTOS, M. J.; MELLO, R. M. A. V.; CATÃO, V.. Expressão de modelos no ensino de Química: o que pensam os estudantes sobre átomos e moléculas? **Revista Educação Pública**, Rio de Janeiro, v. 23, n° 3, 24 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/23/2/expressao-de-modelos-no-ensino-de-quimica-o-que-pensam-os-estudantes-sobre-atomos-e-moleculas>.

SANTOS, I. C. Reflexões acerca do currículo: uma análise dos documentos oficiais bncc, pcns e dcns. **CONEDU - Didática e Currículo** (Vol. 02). Campina Grande: Realize Editora, 2024. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/106097>>. Acesso em: 21/07/2025 19:58

SCHFFLER, G.L.; DEL PINO, J.C. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud e o ensino de radioatividade. **Experiencias em Ensino de Ciências** V.8, No.1, 2013.

SILVA, A. F.; FERREIRA, J. H.; VIEIRA, C. A. O ENSINO DE CIÊNCIAS NO ENSINO FUNDAMENTAL E MÉDIO: reflexões e perspectivas sobre a educação transformadora. **Revista Exitus**, Santarém/PA, Vol. 7, N° 2, p. 283-304, Maio/Ago 2017a.

SILVA, A.C. Radiações e suas relações com a medicina: uma revisão na área de ensino de Física. **Investigações em Ensino de Ciências** – V22 (3), pp.40-61, dez, 2017b.

SILVA, R. D. Et al. Abordagem CTS da energia nuclear na educação de jovens e adultos. **X congreso internacional sobre investigación en didáctica de las ciencias**. sevilla. 5-8 de septiembre de 2017c.

SILVA, D.J. **A problematização no ensino da radioatividade em nível médio**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Programa de Pós-graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência. Goytacazes – RJ, 2019a.

SILVA, V.C. **Conhecendo as partículas subatômicas através de um jogo educacional: viajando ao invisível**. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2019b.

SILVA, G. P.. **Inserção do tema de Física Nuclear no Ensino Médio: desconstruindo e construindo um novo olhar sobre radioatividade e energia nuclear**. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019c. Disponível em: <https://tede.ufrjr.br/jspui/handle/jspui/4375>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SILVA, A.C. As radiações na medicina: O que dizem livros didáticos de física do ensino médio? **Investigações em Ensino de Ciências** – V24 (3), pp.222-243, dez, 2019d.

SILVA, N.F.L.. **Uma abordagem para o ensino de modelos atômicos e radioatividade a partir da História da Ciência**. 2019. 206 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2019e.

SILVA JUNIOR, A. C..; LONDERO, L. A transposição didática aplicada aos raios X nas coleções didáticas de física do pnld (2018-2020). **Ciência em Tela**, v. 12, n. 2, p. 1-16, 2019.

SILVA JUNIOR, A.C.; LONDERO, L.S. A Transposição Didática do Fenômeno da Radioatividade em Manuais Escolares de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, p. 259-287, abr. 2022.

SILVA, J.T. **O jogo digital radio lab como mediador no processo de aprendizagem de conceitos de radioatividade: um estudo a partir da imaginação**. Dissertação, UFPE- CARUARU, 2023.

SILVA, W.R.F.; FONSECA, J.M. Desenvolvimento de uma máquina de raios X, um detector Geiger e um goniômetro de baixo custo para estudo sobre raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 45, 2023.

SILVA JUNIOR, C.N.; COSTA, L.V.B. Desafios e possibilidades no ensino de estrutura atômica e ligações química: revisão de concepções dos estudantes e sugestões de propostas de ensino. **ENCITEC** – Santo Ângelo - Vol. 14, n. 1., p. 06-25, jan./abr. 2024.

SCHNEIDER, R. B. Et al. Radioactivity 1.0: um produto educacional para o uso em aulas de Física. **Boletim online de Educação Matemática**, Florianópolis, v.1, 2023.

SOARES, A. S. A radioatividade numa visão química e social. Anais **I CONAPESC**. Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/17759>>. Acesso em: 21/07/2025 19:05

STUMPF, A.; OLIVEIRA, L.D. júri simulado: o uso da argumentação na discussão de questões sociocientíficas envolvendo radioatividade. **Experiências em Ensino de Ciências** V.11, N. 2, 2016.

THOMÉ, A. R. M.; MENDES, M. F. A. O filme “radioactive” e a história das mulheres na ciência: uma proposta de sequência didática. **ACTIO**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 1-20, jan./abr. 2023.

ULIANO, V. **Uma sequência didática para introdução à física das radiações ionizantes no ensino médio**. Dissertação, Programa de Pós- Graduação no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física. UTFPR, Campo Mourão, 2018.

VERGNAUD, G. (1982). **A classification of cognitive tasks and operations of thought involved in addition and subtraction problems**. In Carpenter, T., Moser, J. & Romberg, T. (1982). Addition and subtraction. A cognitive perspective. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum. pp. 39-59.

VERGNAUD, Gérard. **La théorie des champs conceptuels. Recherches en Didactique des Mathématiques**, 1990.

VERGNAUD, G. (1993). Teoria dos campos conceituais. In Nasser, L. (Ed.) Anais do 1º **Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro**. p. 1-26.

VERGNAUD, G. (1997). **The nature of mathematical concepts**. In Nunes, T. & Bryant, P. (Eds.) Learning and teaching mathematics, an international perspective. Hove (East Sussex), Psychology Press Ltd.

VERGNAUD, Gérard. A comprehensive theory of representation for mathematics education. **The Journal of Mathematical Behavior**, New York, v. 17, n. 2, p. 167–181, 1998

VIANA, E.S.; BATISTA, S.C.F. Ensino de Radioatividade: utilização de vídeos como ferramentas pedagógicas. **VÉRTICES**, Campos dos Goytacazes/RJ, v.17, n.2, p. 103-127, maio/ago. 2015

VIEIRA, D.O.V. Et al. Estudos sobre o ensino e aprendizagem de conceitos em eletroquímica: uma revisão. **ENCITEC** – Santo Ângelo - Vol. 11, n. 1., p. 172-188, jan./abr. 2021.

VYGOTSKI, L. S. **A formação social da mente**. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

ANEXO A – Parecer do Comitê de Ética



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: UMA UNIDADE DE ENSINO À LUZ DA TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS PARA O ESTUDO DA RADIOATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO

Pesquisador: VITOR BEZERRA LADEIRA

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 70523323.8.0000.0021

Instituição Proponente: INSTITUTO DE FÍSICA - UFMS

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DA NOTIFICAÇÃO

Tipo de Notificação: Outros

Detalhe: Correção das recomendações do último parecer do projeto

Justificativa: Foram feitas as correções recomendadas no do último parecer do projeto

Data do Envio: 30/08/2023

Situação da Notificação: Parecer Consubstanciado Emitido

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 6.329.613

Apresentação da Notificação:

De acordo com o pesquisador: "Foram feitas as correções recomendadas no do último parecer do projeto."

Objetivo da Notificação:

Notificação para apresentação da Versão final do Projeto detalhado, referente ao Protocolo de pesquisa aprovado sob Número do Parecer: 6.227.726

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Não se aplica.

Comentários e Considerações sobre a Notificação:

Não se aplica.

Endereço: Av. Costa e Silva, s/nº - Pioneiros, Prédio das Pró-Reitorias, Hércules Maymone, 1º andar
Bairro: Pioneiros **CEP:** 70.070-900
UF: MS **Município:** CAMPO GRANDE
Telefone: (67)3345-7187 **Fax:** (67)3345-7187 **E-mail:** cepconep.propp@ufms.br



Continuação do Parecer: 6.329.613

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Não se aplica.

Recomendações:

Não se aplica.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Notificação aprovada.

Considerações Finais a critério do CEP:

E de responsabilidade do pesquisador submeter ao CEP semestralmente o relatório de atividades desenvolvidas no projeto e, se for o caso, comunicar ao CEP a ocorrência de eventos adversos graves esperados ou não esperados. Também, ao término da realização da pesquisa, o pesquisador deve submeter ao CEP o relatório final da pesquisa. Os relatórios devem ser submetidos através da Plataforma Brasil, utilizando-se da ferramenta de NOTIFICAÇÃO.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Outros	PROJETO_MODIFICADO.pdf	30/08/2023 16:09:06	VITOR BEZERRA LADEIRA	Postado

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

CAMPO GRANDE, 27 de Setembro de 2023

Assinado por:
Fernando César de Carvalho Moraes
(Coordenador(a))

Endereço: Av. Costa e Silva, s/nº - Pioneiros e Prédio das Pró-Reitorias e Hércules Maymone e 1º andar
Bairro: Pioneiros **CEP:** 70.070-900
UF: MS **Município:** CAMPO GRANDE
Telefone: (67)3345-7187 **Fax:** (67)3345-7187 **E-mail:** cepconep.propp@ufms.br

ANEXO B – Declaração de Anuência da Instituição Coparticipante**AUTORIZAÇÃO DA ESCOLA**

Sr. Diretor Álvaro de Lima Silva

Solicitamos autorização institucional para a realização da pesquisa intitulada “*Uma unidade de ensino à luz da Teoria dos Campos Conceituais para o estudo da Radioatividade no Ensino Médio*”, a ser realizada nesta instituição de Ensino (Escola Estadual Zélia Quevedo Chaves) com estudantes da Educação Básica do terceiro ano do Ensino Médio. A investigação será coordenada pelos pesquisadores Vitor Bezerra Ladeira e Profª. Drª. Lisiane Barcellos Calheiro, do Programa de Pós-Graduação Mestrado Acadêmico em Ensino de Ciências do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

O objetivo central do estudo é desenvolver uma unidade de ensino para analisar o possível domínio do campo conceitual da radioatividade de estudantes do 3º ano do Ensino Médio a partir de situações-problema em diferentes níveis de complexidade. Todos os dados coletados serão armazenados em arquivos digitais, porém somente o pesquisador terá acesso aos dados, não sendo divulgada de forma alguma os dados dos estudantes.

Espera-se que esta pesquisa possa contribuir para a aprendizagem dos estudantes dos objetos de conhecimento de Estrutura da Matéria, Ondas Eletromagnéticas, Radiações ionizantes, Partículas Radioativas, Decaimento Radioativo, Isótopos e Fissão nuclear. Salientamos que todas as atividades a serem desenvolvidas estão de acordo com as Competências e Habilidades do Currículo de Referência de Mato Grosso do Sul.

Os benefícios desta pesquisa são os conhecimentos adquiridos sobre Radioatividade, além de serem inseridos em um contexto que favorece a relação dos conhecimentos pedagógicos e o estudo de tópicos contemporâneos, bem como as habilidades e competências que serão desenvolvidas durante a aplicação da sequência didática, tais como, trabalho em equipe, tomada rápida de decisão, argumentação, coordenação motora e visão estratégica.

Qualquer dado que possa te identificar será omitido na divulgação dos resultados da pesquisa, e o material será armazenado em local seguro. A qualquer momento, durante a pesquisa, ou posteriormente, você poderá solicitar do pesquisador informações sobre a participação e/ou sobre a pesquisa, o que poderá ser feito através dos meios de contato explicitados neste Termo.

O estudante só será participante voluntário desta pesquisa se atender o critério de inclusão que é a assinatura do Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (TALE), e sendo menores de idade, precisam ter a autorização dos pais ou responsáveis, via assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

A presente pesquisa “*Uma unidade de ensino usando à luz Teoria dos Campos Conceituais para o estudo da Radioatividade no Ensino Médio*” poderá ter os resultados expostos à comunidade acadêmica por meio de artigos científicos e dissertação de mestrado.

A

A participação dos alunos como sujeito de pesquisa é voluntária, isto é, ela não é obrigatória e ele tem plena autonomia para decidir se irá ou não participar. Caso no decorrer da pesquisa o estudante queira desistir, poderá solicitar ao pesquisador, a qualquer fase da pesquisa, para retirar e eliminar os dados pertinentes a essa pessoa, sem penalização alguma.

Os únicos riscos previstos neste estudo são o tempo demorado ao responder os questionários, participar das atividades, e o constrangimento ao não saber responder alguma pergunta dos questionários. Entretanto, para minimizar esse risco, asseguramos que o estudante tem liberdade de se recusar a responder questões que lhe causem desconforto emocional e/ou constrangimento em questionários e/ou demais atividades propostas na pesquisa. Além disso, o pesquisador sempre estará atento aos sinais verbais ou não verbais de desconforto do participante, intervindo imediatamente caso ocorra. Será assegurado a todos os participantes a confidencialidade e a privacidade dos documentos gerados pelo presente estudo. Os questionários e atividades didáticas serão aplicados em sala de aula, não ocupando demasiadamente o tempo do aluno ao respondê-los.

Na certeza de contarmos com a colaboração desta Instituição de Ensino, agradecemos antecipadamente. Para perguntas ou problemas referentes ao estudo entre em contato com Vitor Bezerra Ladeira (pesquisador), no telefone (67) 99242-3297 ou mande um e-mail para: vitorbl.29@hotmail.com. Para perguntas sobre seus direitos a respeito da pesquisa, entrar em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da UFMS, no telefone (67) 3345-7187 ou procure pelo endereço físico: Campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, prédio das Pró-Reitorias 'Hércules Maymone' – 1º andar, CEP: 79010900. Campo Grande – MS. E-mail: cepconep.propp@ufms.br.

Eu, Álvaro de Lima Silva diretor da Escola Estadual Zélia Quevedo Chaves, localizado na rua Gaudilei Brun, 250 Campo Grande – MS, estou ciente que a pesquisa intitulada "*Uma unidade de ensino à luz Teoria dos Campos Conceituais para o estudo da Radioatividade no Ensino Médio*" será realizada nesta instituição de ensino e coordenada pelo pesquisador Vitor Bezerra Ladeira, mestrando da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pelo Programa de Mestrado Acadêmico em Ensino de Ciências, diante disso, autorizo a realização da pesquisa.

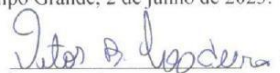
Declaro, também, que fui informado pela responsável sobre as características e objetivos da pesquisa, bem como das atividades que serão realizadas na instituição a qual represento.

Atenciosamente,

Campo Grande, 2 de junho de 2023.


Álvaro de Lima Silva
Diretor

Álvaro de Lima Silva
Diretor D. O. 10.132 de 30/03/2020
Res. "P" SED n. 965 de 26/03/2020



Vitor Bezerra Ladeira
Pesquisador

APÊNDICE 1 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

A pessoa pela qual você é responsável está sendo convidada a participar da pesquisa intitulada “Uma unidade de ensino à luz da teoria dos campos conceituais para o estudo radioatividade no ensino médio”, desenvolvida pelos pesquisadores Vítor Bezerra Ladeira e Lisiane Barcellos Calheiro. O objetivo central do estudo é analisar o campo conceitual da Radioatividade de estudantes do ensino medio a partir de uma Unidade de ensino potencialmente significativa .

O convite para a sua participação se deve à ser matriculado na Escola Estadual Zelia Quevedo Chaves e no 3º ano do ensino médio. Consentir a participação dele(a) é ato voluntário, isto é, não obrigatório, e você tem plena autonomia para decidir se quer ou não que ele(a) participe, bem como retirar a sua anuência a qualquer momento. Nem você nem ele terão prejuízo algum caso decida não consentir com a participação, ou desistir da mesma. Contudo, ela é muito importante para a execução da pesquisa. Serão garantidas a confidencialidade e a privacidade das informações prestadas pelo participante.

Qualquer dado que possa identificar o participante será omitido na divulgação dos resultados da pesquisa, e o material será armazenado em local seguro. A qualquer momento, durante a pesquisa, ou posteriormente, você poderá solicitar do pesquisador informações sobre a participação e/ou sobre a pesquisa, o que poderá ser feito através dos meios de contato explicitados neste Termo.

A sua participação durante as aulas consistirá em assistir as aulas expositivas com o professor pesquisador e realizar as atividades propostas. A sua participação consistirá em diálogos sobre o tema, atividades experimentais, responder questionários referentes aos conteúdos desenvolvidos e opinários elaborados pelo pesquisador do projeto. As respostas só serão utilizadas para publicação de trabalhos com devida autorização e sigilo sobre a identidade do aluno. Ao final da pesquisa, todo material será mantido em arquivo, sob guarda e responsabilidade do pesquisador responsável, por pelo menos 5 anos, conforme Resolução CNS nº 466/2012.

O benefício relacionado com a sua colaboração nesta pesquisa é inserção de um contexto que favoreça a relação dos conhecimentos pedagógicos e estudos de tópicos da Física Moderna e Contemporânea, além de estarem vivenciado metodologias que favorecem alfabetização científica.

Em relação aos riscos dos participantes, poderá vivenciar situação de constrangimento na resposta diante de questionamento, para minimiza-lo ficará realçado ao estudante sobre sua liberdade de responder as questões. Para as atividades experimentais, caso haja, os participantes terão orientação, acompanhamento e itens de segurança necessários. Os experimentos serão realizados todos na presença do professor pesquisador. Cabe salientar que todas as medidas de proteção e uso de Equipamentos de Proteção Individual.

Em caso de gastos decorrentes da participação na pesquisa, a pessoa pela qual você é responsável será ressarcido. Em caso de eventuais danos decorrentes da participação na pesquisa, o participante será indenizado.

Os resultados desta pesquisa serão divulgados em palestras dirigidas ao público participante, relatórios individuais para os entrevistados, artigos científicos e no formato de dissertação/tese.

Este termo é redigido em duas vias, sendo uma do participante da pesquisa e outra do pesquisador. Em caso de dúvidas quanto à sua participação, você pode entrar em contato com o pesquisador responsável através do email vitorbl.29@hotmail.com, do telefone (67) 99242-3297, ou por meio do endereço R. Estácia, 439.

Rubrica do participante

Rubrica do pesquisador

Em caso de dúvida quanto à condução ética do estudo, entre em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa da UFMS (CEP/UFMS), localizado no Campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, prédio das Pró-Reitorias 'Hércules Maymone' – 1º andar, CEP: 79070900. Campo Grande – MS; e-mail: cepconep.propp@ufms.br; telefone: 67-3345-7187; atendimento ao público: 07:30-11:30 no período matutino e das 13:30 às 17:30 no período vespertino. O Comitê de Ética é a instância que tem por objetivo defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos. Dessa forma, o comitê tem o papel de avaliar e monitorar o andamento do projeto de modo que a pesquisa respeite os princípios éticos de proteção aos direitos humanos, da dignidade, da autonomia, da não maleficência, da confidencialidade e da privacidade.

[] marque esta opção se você concorda que durante sua participação na pesquisa seja realizada “Uma unidade de ensino à luz da teoria dos campos conceituais para o estudo radioatividade no ensino médio”

[] marque esta opção se você não concorda que durante sua participação na pesquisa seja realizada “Uma unidade de ensino à luz da teoria dos campos conceituais para o estudo radioatividade no ensino médio”

Nome e assinatura do pesquisador

_____, de _____ de _____
Local e data

Nome e assinatura do responsável pelo participante da pesquisa

_____, de _____ de _____
Local e data

APÊNDICE 2 – Termo de Assentimento Livre e Esclarecido – TALE

TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Prezado participante, você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa intitulada “Uma unidade de ensino à luz da teoria dos campos conceituais para o estudo radioatividade no ensino médio”, desenvolvida pelos pesquisadores Vitor Bezerra Ladeira e Lisiane Barcellos Calheiro. O objetivo central do estudo é analisar o campo conceitual da Radioatividade de estudantes do ensino médio a partir de uma Unidade de ensino potencialmente significativa.

O convite para a sua participação se deve à ser matriculado na Escola Estadual Zelia Quevedo Chaves e no 3º ano do ensino médio. Sua participação é voluntária, isto é, ela não é obrigatória, e você tem plena autonomia para decidir se quer ou não participar, bem como retirar sua participação a qualquer momento. Você não terá prejuízo algum caso decida não consentir sua participação, ou desistir da mesma. Contudo, ela é muito importante para a execução da pesquisa. Serão garantidas a confidencialidade e a privacidade das informações por você prestadas.

Qualquer dado que possa identificá-lo será omitido na divulgação dos resultados da pesquisa, e o material será armazenado em local seguro. Não serão utilizadas imagens e/ou audios em nenhum momento da pesquisa. A qualquer momento, durante a pesquisa, ou posteriormente, você poderá solicitar do pesquisador informações sobre sua participação e/ou sobre a pesquisa, o que poderá ser feito através dos meios de contato explicitados neste Termo.

A pesquisa será desenvolvida durante as aulas de formação básica da disciplina de Física, sem prejudicar o desenvolvimento do conteúdo da disciplina, uma vez que os conhecimentos trabalhados estão no currículo proposto pela Secretaria Municipal de Educação. A sua participação durante as aulas consistirá em assistir as aulas expositivas com o professor pesquisador e realizar as atividades propostas. A sua participação consistirá em diálogos sobre o tema, atividades experimentais, responder questionários referentes aos conteúdos desenvolvidos e opiniões elaborados pelo pesquisador do projeto. As respostas só serão utilizadas para publicização de trabalhos com devida autorização e sigilo sobre a identidade do aluno. Ao final da pesquisa, todo material será mantido em arquivo, sob guarda e responsabilidade do pesquisador responsável, por pelo menos 5 anos, conforme Resolução CNS nº 466/2012.

O benefício relacionado com a sua colaboração nesta pesquisa é inserção de um contexto que favoreça a relação dos conhecimentos pedagógicos e estudos de tópicos da Física Moderna e Contemporânea, além de estarem vivenciando metodologias que favorecem alfabetização científica.

Em relação aos riscos dos participantes, poderá vivenciar situação de constrangimento na resposta diante de questionamento, para minimizá-lo ficará realçado ao estudante sobre sua liberdade de responder as questões. Para as atividades experimentais, caso haja, os participantes terão orientação, acompanhamento e itens de segurança necessários. Os experimentos serão realizados todos na presença do professor pesquisador. Cabe salientar que todas as medidas de proteção. O pesquisador não prevê gastos aos participantes todo o material didático será fornecido pelos pesquisadores.

Em caso de gastos decorrentes de sua participação na pesquisa, você (e seu acompanhante, se houver) será ressarcido.

Em caso de eventuais danos decorrentes de sua participação na pesquisa, você será indenizado.

Rubrica do participante

Rubrica do pesquisador

Os resultados desta pesquisa serão divulgados em palestras dirigidas ao público participante, relatórios individuais para os entrevistados, artigos científicos e no formato de dissertação/tese.

Este termo é redigido em duas vias, sendo uma do participante da pesquisa e outra do pesquisador. Em caso de dúvidas quanto à sua participação, você pode entrar em contato com o pesquisador responsável através do email vitorbl.29@hotmail.com, do telefone (67) 99242-3297, ou por meio do endereço R. Estática, 439

Em caso de dúvida quanto à condução ética do estudo, entre em contato com o Comitê de Ética em Pesquisa da UFMS (CEP/UFMS), localizado no Campus da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, prédio das Pró-Reitorias 'Hércules Maymone' – 1º andar, CEP: 79070900. Campo Grande – MS; e-mail: cepconep.propp@ufms.br; telefone: 67-3345-7187; atendimento ao público: 07:30-11:30 no período matutino e das 13:30 às 17:30 no período vespertino. O Comitê de Ética é a instância que tem por objetivo defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos. Dessa forma, o comitê tem o papel de avaliar e monitorar o andamento do projeto de modo que a pesquisa respeite os princípios éticos de proteção aos direitos humanos, da dignidade, da autonomia, da não maleficência, da confidencialidade e da privacidade.

[] marque esta opção se você concorda que durante sua participação na pesquisa seja realizada “Uma unidade de ensino à luz da teoria dos campos conceituais para o estudo radioatividade no ensino médio”

[] marque esta opção se você não concorda que durante sua participação na pesquisa seja realizada “Uma unidade de ensino à luz da teoria dos campos conceituais para o estudo radioatividade no ensino médio”

Nome e assinatura do pesquisador

_____, de _____ de _____
Local e data

Nome e assinatura do participante da pesquisa

_____, de _____ de _____
Local e data

APÊNDICE 3 – Slides referentes ao conteúdo de radioatividade ministrado.

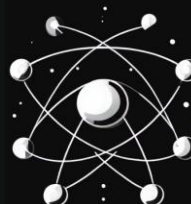


Introdução à Radioatividade

A radioatividade é um fenômeno natural em que certos elementos químicos instáveis emitem partículas e ondas eletromagnéticas, chamadas de radiação. Este é um processo fundamental para entendermos a formação e transformação dos átomos no universo.

Como a Radioatividade Surge

- Núcleo Atômico Instável**
A radioatividade surge quando o núcleo de um átomo é instável, possuindo um excesso de energia que precisa ser liberado.
- Rearranjo Nuclear**
Para atingir um estado mais estável, o núcleo instável se transforma espontaneamente, emitindo partículas ou ondas eletromagnéticas.
- Transformação Atômica**
Esse processo de transformação atômica é a essência da radioatividade, que ocorre de maneira aleatória e imprevisível.



Núcleo Instável

Excesso de Energia

Um núcleo atômico é instável quando possui um excesso de energia ou de partículas (prótons e nêutrons) em relação à configuração mais estável.

Busca por Estabilidade

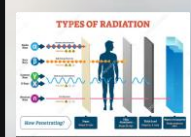
Esse núcleo instável tenta atingir a estabilidade por meio da emissão de partículas ou ondas eletromagnéticas, gerando a radioatividade.

Transformação Natural

A transformação do núcleo instável é um processo natural, aleatório e imprevisível, que não pode ser interrompido ou controlado.

Tipos de Radiação

- Radiação Alfa**
Constituída por partículas com carga elétrica positiva, formadas por dois prótons e dois nêutrons.
- Radiação Beta**
Emissão de elétrons de alta energia a partir do núcleo atômico.
- Radiação Gama**
Ondas eletromagnéticas de alto poder de penetração, emitidas durante a desintegração de núcleos atômicos.



Características da Partícula Alfa

Composição

As partículas alfa são compostas por dois prótons e dois nêutrons, equivalentes a um núcleo de hélio.

Carga Elétrica

Possuem carga elétrica positiva (+2), pois são constituídas por dois prótons.

Penetração

Têm baixa capacidade de penetração, sendo facilmente bloqueadas por finas barreiras de material.

Efeitos Biológicos

Causam danos significativos quando absorvidas pelo organismo devido à sua alta ionização.



Características da Partícula Beta

Elétrons de Alta Energia

As partículas beta são elétrons de alta energia ejetados do núcleo atômico.

Carga Elétrica Negativa

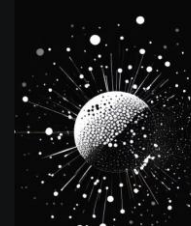
Possuem carga elétrica negativa (-1), pois são constituídas por elétrons.

Maior Penetração

Têm maior capacidade de penetração do que as partículas alfa, porém ainda são bloqueadas por barreiras de material.

Efeitos Biológicos

Podem causar danos aos tecidos vivos devido à sua capacidade de ionização.



Características da Radiação Gama

Natureza Eletromagnética

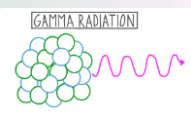
A radiação gama é composta por ondas eletromagnéticas de alta frequência e energia.

Alto Poder de Penetração

Tem grande capacidade de penetração, sendo capaz de atravessar diversos materiais.

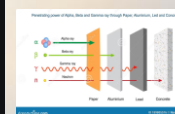
Efeitos Biológicos

Pode causar danos graves aos tecidos vivos, sendo utilizada em tratamentos oncológicos.



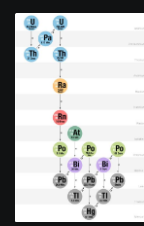
Penetrabilidade: Exemplo

Partícula Alfa	Baixo Poder de Penetração	Facilmente bloqueada por papel ou pele
Partícula Beta	Médio Poder de Penetração	Pode atravessar a pele, mas é bloqueada por metal
Radiação Gama	Alto Poder de Penetração	Pode atravessar diversos materiais, incluindo metal



Série Radioativa

- Elemento Pai**
Elemento radioativo que inicia a série de decaimento.
- Decaimento em Cadeia**
O elemento pai se transforma em novos elementos filhos, que por sua vez também podem ser radioativos.
- Estabilidade Final**
Ao final da série, é atingido um elemento estável, finalizando o processo de decaimento radioativo.



Exemplo de uma Série Radioativa

Urânio-238

Elemento radioativo pai que inicia a série de decaimento.

Transformações

O urânio-238 se transforma em uma sequência de elementos filhos, como o tório-234, o protactínio-234 e o urânio-234.

Chumbo-206

Elemento estável que é o produto final da série de decaimento do urânio-238.



Radioatividade: Aula 2

Nesta segunda aula, vamos explorar os conceitos essenciais da radioatividade, como isótopos radioativos, meia-vida e os diferentes tipos de decaimento radioativo. Além disso, iremos discutir as importantes aplicações da radioatividade na datação de fósseis, medicina e produção de energia.

Isótopos e Isótopos radioativos

- Isótopos**
Átomos com o mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons.
- Isótopos radioativos**
Isótopos instáveis que emitem radiação para se tornarem mais estáveis.
- Aplicações**
Isótopos radioativos têm usos importantes em medicina, indústria e pesquisa científica.



Meia vida: O que é

- Definição**
Meia-vida é o tempo necessário para que a atividade radioativa de um elemento seja reduzida à metade.
- Importância**
A meia-vida é uma propriedade única de cada isótopo radioativo, essencial para prever seu decaimento.
- Aplicações**
A meia-vida é usada para determinar a idade de materiais antigos e para calcular a dosagem segura de radiação em tratamentos médicos.

Cálculo da meia vida

Fórmula

A atividade radioativa diminui exponencialmente com o tempo de acordo com a fórmula:

$$A = A_0 \cdot (1/2)^{(t/T_{1/2})}$$

Exemplo

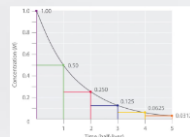
Se um isótopo tem meia-vida de 5.730 anos e inicialmente possui 100 gramas, após 5.730 anos restará apenas 50 gramas.

Aplicações

O cálculo da meia-vida é essencial para datar fósseis, minerais e artefatos arqueológicos.

Meia-vida e Constante de Decaimento

- Relação Inversa**
A meia-vida e a constante de decaimento são inversamente proporcionais.
- Cálculo**
A constante de decaimento (λ) é calculada como $\lambda = \ln(2) / (t_{1/2})$.
- Aplicações**
Essa relação é fundamental para prever o comportamento de materiais radioativos.



Decaimento Radioativo

- Núcleo Instável**
Isótopos radioativos possuem núcleos atômicos instáveis.
- Emissão de Radiação**
Para se tornarem mais estáveis, esses núcleos emitem diferentes tipos de radiação.
- Produto Final**
O decaimento radioativo resulta em um núcleo estável, com menos energia.



Taxa de decaimento

			
Tempo	Massa	Radiação	Curva
A taxa de decaimento diminui exponencialmente com o tempo.	A quantidade de material radioativo restante diminui com o tempo.	A radiação emitida também diminui exponencialmente com o tempo.	O decaimento radioativo segue uma curva exponencial característica.

Fontes de pesquisa e Imagens

CARDOSO, F. M. Et al. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. 2018. 120 p.

<https://brasiltipografia.com.br/quimica/quimica-alfa.htm>

https://nuc.com.br/restaurantes_quimica/curso/aula-1-radioatividade/

<https://manualdequimica.com>

<https://www.renato.fingert.com/>

<https://quimica.org.br/>

APÊNDICE 4 – Atividade com recortes de notícias desenvolvida com os estudantes

Situação problema: Quando falamos em radioatividade, muitas vezes vem a nossa mente incidentes marcantes na história, como Chernobyl e o Goiânia. Abaixo mostramos alguns recortes de notícias relacionados a radioatividade que acontecerem nos últimos anos.

Figura 1 - Recorte da notícia “Chernobyl Brasileiro: Goiás teve um dos piores acidentes nucleares até hoje⁵”.

Rescaldo do acidente

A limpeza da área afetada pelo acidente com o cézio-137 gerou 13,4 toneladas de resíduo radioativo que foram armazenadas em contêineres especiais, enterrados sob uma montanha artificial de terra e camadas de concreto e chumbo para evitar a propagação de radioatividade.

O trecho da notícia fala que o material radioativo foi enterrado sob concreto e chumbo. Por que você acha que isso deve ser feito e não ser enterrado apenas com terra de forma convencional? Explique

Figura 2. Recorte da notícia “ O que três itens radioativos desaparecidos nos últimos três meses têm em comum⁶?”

Quão perigosos são os itens radioativos perdidos?

Muito depende do tipo de isótopo radioativo dentro de um dispositivo e se ele está contido na blindagem ou aberto aos elementos.

O risco de exposição à radiação da câmera que desapareceu no Texas é “muito baixo”, especialmente porque o material radioativo é encapsulado por várias camadas de proteção, disseram autoridades.

Mas a cápsula na Austrália e o cilindro na Tailândia continham Césio-137, uma substância altamente radioativa que é potencialmente letal.

Especialistas alertam que o Césio-137 pode criar sérios problemas de saúde para as pessoas que entram em contato com ele: queimaduras na pele por exposição próxima, doenças causadas pela radiação e riscos potencialmente fatais de câncer, especialmente para aqueles expostos inconscientemente por longos períodos de tempo.

O Césio-137 tem uma meia-vida de cerca de 30 anos, o que significa que pode representar um risco para a população nas próximas décadas, se não for encontrado.

⁵ <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/142265-chernobyl-Brasileiro-goias-teve-piores-acidentes-nucleares.htm#:~:text=Acidente%20de%20alto%20risco&text=O%20acidente%20com%20o%20c%C3%A9sio,e%20Fukushima%20apresentou%20n%C3%ADvel%206.>

⁶ <https://www.cnnBrasil.com.br/internacional/o-que-tres-itens-radioativos-desaparecidos-nos-ultimos-tres-meses-tem-em-comum/>

No recorte da notícia, o autor diz que o Césio-137 pode representar um risco nas próximas décadas, por que ele afirma isso? Explique.

Figura 3. Recorte da notícia “ Cientistas fazem grande descoberta sobre nova forma de decaimento radioativo que pode mudar tudo⁷”

Radiação e radioatividade

Embora estejam relacionadas de alguma forma, elas não são a mesma coisa. A **radiação** é um fenômeno presente na natureza que reúne a emissão, o transporte e a transferência de energia tanto através do vácuo quanto de um meio material. O interessante é que a energia pode ser transportada de duas formas diferentes: na forma de ondas eletromagnéticas ou como partículas.

A **radioatividade**, entretanto, é o processo natural que explica como um núcleo atômico instável perde energia na tentativa de atingir um estado mais estável. E para conseguir isso emite radiação. Os núcleons, que são os prótons e nêutrons do núcleo atômico, conseguem permanecer juntos e superar a repulsão natural que os prótons enfrentam porque a presença dos nêutrons permite que a força nuclear forte atue como uma cola capaz de se impor ao eletromagnético.

O recorte fala a relação entre radiação e transporte de energia através de partículas e ondas, e em um segundo momento fala sobre radioatividade que é a perda energia através da radiação. Descreva como isso acontece.

Figura 4. Recorte da notícia “ Descarte de águas do desastre nuclear de Fukushima no oceano vai além do domínio japonês⁸”

Contaminação radioativa

Para compreender o tamanho da discussão é preciso saber o que é a contaminação radioativa. Ela ocorre independentemente e depende do processo de meia-vida do elemento químico: “Os elementos radioativos quimicamente têm o mesmo comportamento dos elementos estáveis, o que eles diferem é que emitem algum tipo de radiação, ou seja, têm então os processos nucleares. Esses que estão envolvidos no núcleo atômico, da emissão atômica, que faz com que esses elementos, ditos radioativos, tenham um processo de decaimento para um elemento estável e esse processo de decaimento pode demorar segundos, décadas, milhares ou milhões de anos. Tem a questão da contaminação radioativa por elementos de meia-vida longa”, explica o professor.

⁷ <https://br.ign.com/ciencia/113587/news/cientistas-fazem-grande-descoberta-sobre-nova-forma-de-decaimento-radioativo-que-pode-mudar-tudo#:~:text=Neste%20processo%20de%20decaimento%2C%20um,agora%20nunca%20tinha%20sido%20observado.>

⁸ <https://jornal.usp.br/radio-usp/descarte-de-aguas-do-desastre-nuclear-de-fukushima-no-oceano-vai-alem-do-dominio-japones/#:~:text=do%20dom%C3%ADnio%20jap%C3%AAs-,Descarte%20de%20%C3%A1guas%20do%20desastre%20nuclear%20de%20Fukushima,vai%20al%C3%A9m%20do%20dom%C3%ADnio%20jap%C3%AAs&text=O%20Jap%C3%A3o%20planeja%20despejar%20mais,no%20Oceano%20Pac%C3%ADfico%20em%202023.>

Sabemos que a natureza sempre busca a estabilidade, no recorte o autor fala que para um elemento radioativo (instável) se tornar estável ele passa por um processo de decaimento. Como você explicaria esse processo? Esse tempo em que ele comenta que pode demorar para decair, está relacionada a que conceito?

Figura 5. Recorte da notícia “Câmara aprova proposta que permite produção privada de radioisótopos⁹”

A Câmara dos Deputados aprovou nesta terça-feira (05) a Proposta de Emenda à Constituição 517/10, do Senado, que quebra o monopólio governamental para permitir a fabricação pela iniciativa privada de todos os tipos de radioisótopos de uso médico. A matéria irá à promulgação.

Atualmente, a produção e a comercialização desses fármacos no Brasil são realizadas por intermédio da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen) e seus institutos, como o de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), em São Paulo. A matéria foi aprovada em dois turnos de votação com o parecer favorável da [comissão especial](#), de autoria do deputado [General Peternelli \(União-SP\)](#).

A Constituição já autoriza, sob regime de permissão, a comercialização e a utilização de radioisótopos para pesquisa e uso médico. A produção por empresas privadas, no entanto, só é permitida no caso de radiofármacos de curta duração (meia-vida igual ou inferior a duas horas).

Radioisótopos ou radiofármacos são substâncias que emitem radiação usadas no diagnóstico e no tratamento de diversas doenças, principalmente o câncer. Um exemplo é o iodo-131, que emite raios gama e permite diagnosticar doenças na glândula tireoide. Meia-vida é o tempo necessário para que a taxa de decaimento de uma amostra radioativa seja reduzida à metade do seu valor inicial. A meia-vida curta é definida como tendo menos de duas horas.

O recorte menciona várias vezes o termo “radioisótopos”, se você tivesse que explicar para uma pessoa que não tem conhecimento sobre esse assunto e está lendo essa notícia, como você explicaria o que é um radioisótopo?

⁹ <https://www.camara.leg.br/noticias/864470-camara-aprova-proposta-que-permite-producao-privada-de-radioisotopos/>

APÊNDICE 5 – Jogo “Tabuleiro Radioativo”

O jogo foi estruturado para incluir uma variedade de desafios em forma de questões que abrangem os principais tópicos estudados. Através deste método, os estudantes tiveram a oportunidade de aplicar seus conhecimentos de forma prática, colaborativa e competitiva, favorecendo o engajamento e a motivação para o estudo. Abaixo descrevemos o jogo detalhadamente.

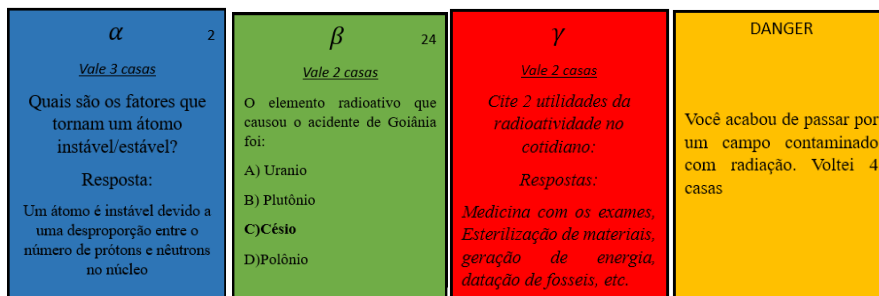
O jogo funcionará da seguinte forma:

- I. Cada estudante ou dupla terá seu pino para o representar no tabuleiro
- II. O estudante joga um dado para indicar quantas casa ele irá andar no tabuleiro
- III. No caso de o estudante parar em uma casa com símbolos, terá que tirar uma carta da categoria de símbolo que corresponde aquela casa.
- IV. Caso o estudante acerte, ele anda mais uma certa quantidade de casa que a carta lhe dará, da mesma forma se ele errar, ele tem que voltar a quantidade de casas.
- V. As categorias de cartas estarão divididas em:
 - α : perguntas relacionadas a conceitos de radioatividade.
 - β : perguntas relacionadas a acontecimentos onde a radioatividade esteve presente como acidentes nucleares.
 - γ : perguntas relacionadas a aplicação da radioatividade no cotidiano.
 - DANGER: cartas com surpresas, podendo ser: jogue novamente, volta casas, fique uma rodada sem jogar, etc...
- VI. Sempre quem irá ler a pergunta será o oponente, pois o gabarito está ao final da pergunta.
- VII. Toda pergunta tem que ser justificada

Figura 1 – Tabuleiro do jogo com radioatividade¹⁰.



¹⁰ <https://drive.google.com/file/d/18xFp3OMhz0N9yyD5VKEiQOzRpKZoaNDN/view>

Figura 2 – Exemplos de cartas para o tabuleiro¹¹

Para o registro das respostas dos estudantes, foi orientado que gravassem um áudio contendo as respostas dadas por eles durante o jogo. Essa metodologia visa assegurar a coleta de dados e permitir uma análise mais detalhada das respostas, facilitando a avaliação do desempenho individual e do grupo. Além disso, o uso de gravações em áudio permite uma revisão posterior, possibilitando que os educadores identifiquem pontos fortes e áreas que necessitam de reforço, além de proporcionar uma maneira prática de monitorar a participação e o engajamento dos estudantes durante a atividade.

Para validação do jogo utilizamos um questionário¹² desenvolvido pelo autor Martins (2020) com base na metodologia MEEGA+, adaptando as questões necessárias para o nosso jogo.

REFERÊNCIAS

MARTINS, T.J.E. **Avaliação de jogo de tabuleiro para apoio ao ensino de Redes de Computadores**. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2020.

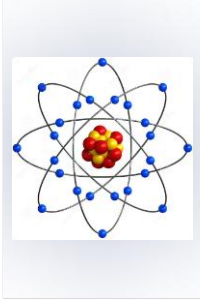
¹¹ https://drive.google.com/file/d/1_iz5Vl6ym00uEMteliwFcxsfglbJc9-/view

¹² <https://drive.google.com/file/d/1r4d8iWdkFP1fnuUZb-uN9MF6MBHKl8ev/view>

APÊNDICE 6 – Slides utilizados para revisão



Radioatividade Revisão



Como a Radioatividade surge?

- 1 Instabilidade Atômica**
Alguns átomos possuem núcleos instáveis, com excesso de prótons e/ou nêutrons, o que os torna propensos a emitir radiação.
- 2 Rearranjo Nuclear**
Para se tornarem mais estáveis, os átomos instáveis passam por um processo de rearranjo nuclear, emitindo partículas e energia.
- 3 Radioatividade**
Essa emissão de radiação é conhecida como radioatividade, um fenômeno natural essencial em diversas aplicações científicas.

Isótopo e radioisótopo

Isótopos
Átomos da mesma espécie, com o mesmo número de prótons, mas com diferentes números de nêutrons.

Radioisótopos
Isótopos radioativos, com núcleos instáveis que se desintegram espontaneamente, emitindo radiação.

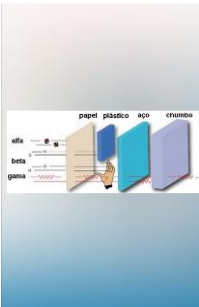
Aplicações
Os radioisótopos têm diversas aplicações, como em exames de imagem médica, datação de materiais e produção de energia nuclear.

Tipos de Radiação

Alfa (α)
Partículas pesadas, com pouca penetração.

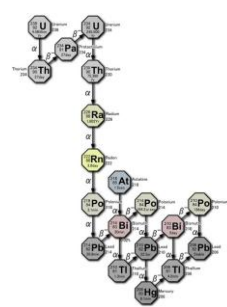
Beta (β)
Elétrons de alta energia, com maior penetração.

Gama (γ)
Ondas eletromagnéticas de alta frequência, muito penetrantes.



Penetrabilidade da Radiação

- 1 Radiação Alfa**
Pouca penetração, bloqueada por folhas de papel ou camadas de pele.
- 2 Radiação Beta**
Maior penetração, bloqueada por finas camadas de metal ou plástico.
- 3 Radiação Gama**
Altamente penetrante, requer espessas blindagens de concreto ou chumbo.



Série Radioativa

- 1 Núcleo Pai**
Núcleo radioativo original.
- 2 Decaimento**
O núcleo pai se transforma em um núcleo filho por meio da emissão de radiação.
- 3 Núcleo Filho**
Núcleo resultante do decaimento, que pode ser estável ou ainda radioativo.



Meia-vida e Decaimento Radioativo

Meia-vida
Tempo necessário para que a quantidade de um radioisótopo se reduza à metade.

Decaimento Exponencial
A quantidade de radioisótopo diminui exponencialmente com o tempo, de acordo com a sua meia-vida.

Emissão de Radiação
Conforme decai, o radioisótopo emite partículas e energia na forma de radiação.

Aplicações da Radioatividade

Medicina
Diagnóstico e tratamento de doenças, como exames de imagem e radioterapia.

Indústria
Produção de energia, detecção de defeitos, esterilização de alimentos e materiais.

Pesquisa
Datação de fósseis, determinação de composição química e estudos nucleares.

Riscos e Segurança

- 1 Proteção**
Uso de equipamentos e barreiras adequados para limitar a exposição à radiação.
- 2 Monitoramento**
Controle e medição constante dos níveis de radiação em ambientes de trabalho.
- 3 Regulamentação**
Leis e normas para o manuseio seguro de materiais e fontes radioativas.
- 4 Conscientização**
Educação e treinamento sobre os riscos e cuidados necessários com a radioatividade.





Conclusão e Considerações Finais

Importância
A radioatividade é um fenômeno natural essencial em diversas áreas da ciência e tecnologia.

Benefícios e Riscos
Seu uso responsável e seguro traz grandes benefícios, mas exige cuidados para evitar riscos.

Equilíbrio
O desafio é manter o equilíbrio entre os benefícios e a mitigação dos riscos da radioatividade.

Fontes de pesquisa e Imagens

CARDOSO, F.M. et al. Radioatividade. Comissão Nacional de Energia Nuclear. –
www.cnen.gov.br
http://brasilenscda.usp.com.br/quimica/emissao_alfa.htm
http://www.com.br/materiais_quimica/curso/aula-3-radioatividade/
<http://manualdequimica.com>
<http://www.materiais.com.br/quimica/>
<http://quimica.app/>