

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 22/08/2026.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Bauru

Rafael Gombrade

DISCURSOS DE ESTUDANTES SOBRE AS RADIAÇÕES
IONIZANTES E O SEU ENSINO EM UMA DISCIPLINA DE UM CURSO
DE FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA

Bauru
2023

Rafael Gombrade

**DISCURSOS DE ESTUDANTES SOBRE AS RADIAÇÕES
IONIZANTES E O SEU ENSINO EM UMA DISCIPLINA DE UM CURSO
DE FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Educação, junto ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Londero da Silva

Bauru
2023

| | |
|-------|--|
| G632d | <p>Gombrade, Rafael</p> <p>Discursos de estudantes sobre as radiações ionizantes e o seu ensino em uma disciplina de formação inicial de professores de física. / Rafael Gombrade. -- Bauru, 2023</p> <p>248 p.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru</p> <p>Orientador: Leandro Londero da Silva</p> <p>1. Radiação ionizante. 2. Professores Formação. 3. Análise do Discurso. I. Título.</p> |
|-------|--|


Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RAFAEL GOMBRADÉ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 22 dias do mês de agosto do ano de 2023, às 14:00 horas, no(a) Unesp - Campus São José do Rio Preto, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de RAFAEL GOMBRADÉ, intitulada OS DISCURSOS DE LICENCIANDOS EM FÍSICA SOBRE AS RADIAÇÕES IONIZANTES E O SEU ENSINO. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Assoc. LEANDRO LONDERO DA SILVA (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Educação / Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas - UNESP São José do Rio Preto, Prof. Dr. EDUARDO ADOLFO TERRAZZAN (Participação Presencial) do(a) Departamento de Educação / Universidade Federal de Santa Maria, Profa. Dra. IRINÉA DE LOURDES BATISTA (Participação Presencial) do(a) Departamento de Física / Universidade Estadual de Londrina, Profa. Dra. SANDRA REGINA TEODORO GATTI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Educação / Faculdade de Ciências - UNESP Bauru, Prof. Dr. HENRIQUE CESAR DA SILVA (Participação Presencial) do(a) Departamento de Metodologia de Ensino / Universidade Federal de Santa Catarina. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final **aprovado**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 LEANDRO LONDERO DA SILVA
Data: 02/09/2023 17:06:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Assoc. LEANDRO LONDERO DA SILVA

Rafael Gombrade

**DISCURSOS DE ESTUDANTES SOBRE AS RADIAÇÕES
IONIZANTES E O SEU ENSINO EM UMA DISCIPLINA DE UM CURSO
DE FORMAÇÃO INICIAL DE PROFESSORES DE FÍSICA**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência, junto ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Leandro Londero da Silva
UNESP – Campus de São José do Rio Preto
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Adolfo Terrazzan
UFSM – Campus de Santa Maria

Prof. Dr. Henrique Cesar da Silva
UFSC – Campus de Florianópolis

Prof. Dr. Irinéa de Lourdes Batista
UEL – Campus de Londrina

Prof. Dra. Sandra Regina Teodoro Gatti
UNESP – Campus de Bauru

Bauru
22 de agosto de 2023

*Ao meu ex-professor e hoje colega de profissão Airton
Algozini Junior, dedico essa tese pois, parafraseando
Isaac Newton, “Se cheguei até aqui foi porque me
apoei no ombro dos gigantes”.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial ao meu pai, Vanderlei, e à minha mãe, Anita, pelo amor, carinho, paciência e por não medirem esforços para que eu pudesse ter uma educação escolar de qualidade. Obrigado por acreditarem em mim! Em especial, agradeço minha mãe pelas inúmeras leituras de revisão dessa tese, me auxiliando nas correções, mesmo não sendo da área de física. Fico feliz em poder ter compartilhado essa vivência de quatro anos com você, realizado discussões sobre os capítulos (em especial o do referencial teórico que você tanto elogiou!) e ter te passado um pouco dos conhecimentos acerca da Física das Radiações Ionizantes. Ao meu pai por ter me ensinado uma das lições mais valiosas da vida quando brincávamos de futebol ainda criança: nunca ter me deixado ganhar! Com o tempo eu entendi que na vida iremos perder muito mais vezes do que vencer e devemos dar nosso melhor se quisermos conquistar nossos objetivos. Com essa lição, meu pai me fez um bom perdedor, além de um homem que sabe valorizar todas as suas conquistas.

Agradeço à minha irmã Bianca pelos bons momentos que compartilhamos; por todas as manhãs em que tínhamos que acordar às cinco da madrugada para irmos até Catanduva estudar. Agradeço pelas vezes em que me acolheu na sua casa, quando eu tinha aulas até tarde da noite e pude descansar para voltar tranquilamente no dia seguinte. Obrigado também pelo carinho, companheirismo e pela amizade.

À Raquel Alves, pelo carinho que me tem dedicado, pelo companheirismo e pelos bons momentos que temos passado juntos.

Agradeço também à minha ex-mulher Natália Nesso, pelos anos de namoro e casamento (doze ao total). Entendo que tudo em nossas vidas são ciclos e, por mais que não estejamos mais juntos, sou eternamente grato pela sua companhia e pelos bons momentos que compartilhamos juntos.

A todos os meus professores, pelo empenho e dedicação que tiveram comigo durante toda minha trajetória escolar e acadêmica. Cada um de vocês tem uma parte significativa nesse trabalho.

Ao meu orientador, prof. Dr. Leandro Londero, pela orientação, dedicação, paciência, pelo conhecimento que me proporcionou, pelos ensinamentos nesses quase dez anos de orientação e por acreditar que esse trabalho seria feito com extrema seriedade e qualidade. Além disso, agradeço pela amizade, pelos diversos jantares no seu apartamento e, também, na casa

da minha mãe, pelas conversas descontraídas e, também, pela seriedade em abordar questões relativas à minha pesquisa. Nossas ideias iniciais não eram convergentes, porém, com seu profissionalismo e sua determinação conseguimos chegar até aqui. Tenho enorme orgulho em ter sido o seu primeiro mestrando e ainda mais orgulho por ser o primeiro doutor que você orienta. Acredito que tenha conquistado seu respeito e espero que possamos trabalhar juntos, agora como colaboradores.

À nossa equipe de pesquisa “Susana Lehrer de Souza Barros”, pelas reuniões sempre produtivas.

À CAPES, pela bolsa cedida no período de 30 (trinta) meses que possibilitaram que eu obtivesse dedicação exclusiva para realizar o desenvolvimento deste trabalho.

À Adriana Aparecida Martins pela revisão final.

A natureza tomada ao pé da letra

Leis da natureza

*Eu escrevo: $\vec{F} = m\vec{\gamma}$
e a flecha voa.*

*Eu escrevo: $E_2 - E_1 = h\nu$
e a folha absorve o Sol.*

*Eu escrevo: $U = -G \frac{Mm}{|R^{\rightarrow} - r^{\rightarrow}|}$
e a Lua levanta a maré.*

*Eu escrevo: $\frac{dE}{d\omega} = \frac{V\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1}$
e o ferro na forja fica vermelho*

*Eu escrevo: $dG = Vdp - SdT + \mu dN$
e a geada cobre a janela*

*Eu escrevo: $\Lambda_{\mu} = J_{\mu\nu}, F_{\mu\nu} = \partial_m \Lambda_{\nu} - \partial_{\nu} \Lambda_{\mu}$
e a luz é.*

Eu escrevo: $P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$

e o vento noturno se levanta.

Eu escrevo: $\sin i = \sin r, \theta = \pi + 2i - 4r, \frac{d\theta}{di} = 0$

E o arco-íris se manifesta.

Eu escrevo: $(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \vec{\nabla}^2) p(\vec{r}, t) = 0$

E ouço sua voz

Eu escrevo, eu descrevo, eu decreto.

O universo se dobra à palavra

Adaptado de Jean Marc Levy-Leblond.

RESUMO

Na educação formal, são os professores que têm a responsabilidade de abordar e tratar as questões relacionadas aos fenômenos relacionados ao tópico da Física das Radiações Ionizantes, sendo esse assunto geralmente encontrado no currículo de Ciências da Natureza e suas tecnologias do terceiro ano do ensino médio no Brasil. Entretanto, devido a questões como a reestruturação do currículo básico, a partir da nova Base Nacional Comum Curricular (BNCC) as aulas de física deixaram de compor o currículo, passando a constituir a grande área de Ciências da Natureza. Essa transformação, acarreta na opção por conteúdos mais familiares aos professores de física que já se encontram no exercício da atividade, fazendo com que tópicos relacionados à Física das Radiações Ionizantes sejam abnegados pelos professores de física.

Em geral, os professores afirmam que a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea, como é o caso das radiações ionizantes, é importante e necessária. Eles argumentam que esse tópico evidencia ao aluno a relação entre a física e a tecnologia, porém algumas produções apontam que esse tema não é abordado nas aulas devido à falta de preparo dos professores e a falta de tempo, causada em partes pelo extenso conteúdo de física clássica que deve ser tratado. Ademais, constatamos que dentro da UNESP existe uma escassez na oferta por disciplinas específicas que discutam aspectos relacionados à Física das Radiações Ionizantes. Diante dessas constatações, nosso trabalho tem como objetivo refletir sobre os discursos produzidos pelos estudantes participantes, acerca dos sentidos que atribuem aos conteúdos e fenômenos do âmbito das Radiações Ionizantes e às possibilidades para o seu ensino, por meio de elementos da Análise de Discurso de linha francesa. Optamos por um modelo de pesquisa de abordagem qualitativa, na medida em que utilizamos questionários como instrumentos de coleta de dados em nosso estudo. Para a análise desses dados, levamos em consideração os aportes teóricos da Análise de Discurso da linha Francesa, a partir das produções de Michel Pechêux e das obras de Eni Orlandi, bem como o trabalho de H.M.C Eijkelhof, pesquisador holandês que trata de questões conceituais da Física das Radiações Ionizantes. As análises indicaram que não há uma disciplina que discuta especificamente aspectos relacionados à temática da física das radiações ionizantes nos cursos de formação inicial da UNESP. A partir dessa constatação, desenvolvemos uma disciplina que contemple esse conteúdo, aja visto que são conceitos relevantes e fundamentais que devem constituir a formação inicial dos licenciandos em física, visto que esse conteúdo se faz presente nos documentos oficiais como parte do conteúdo a ser trabalhado na educação básica.

Já em relação aos sentidos produzidos, pudemos verificar um avanço significativo dos participantes, já que identificamos nos discursos um avanço com o decorrer do curso, nos quais as respostas passaram a estar mais estruturadas, conceitualmente adequados e mais autênticos, sem se prender a respostas obtidas exclusivamente de textos digitais, oriundas de pesquisas da rede. Defendemos uma formação capaz de assegurar ao ensino básico um profissional que esteja preparado para lidar com os desafios que envolvam o ensino das radiações ionizantes e da radioatividade.

Palavras-chave: Física das Radiações Ionizantes. Formação inicial de professores. Análise de discurso.

ABSTRACT

In formal education, it is the teachers who are responsible for addressing and dealing with issues related to phenomena related to the topic of Physics of Ionizing Radiation, this subject being generally found in the curriculum of Natural Sciences and its technologies of the third year of high school in Brazil. However, due to issues such as the restructuring of the basic curriculum, based on the new National Common Curricular Base (BNCC), physics classes are no longer part of the curriculum, becoming the major area of Natural Sciences. This transformation leads to the option for contents that are more familiar to physics teachers who are already in the exercise of the activity, making topics related to the Physics of Ionizing Radiation to be neglected by physics teachers. In general, professors state that the insertion of topics from Modern and Contemporary Physics, as is the case of ionizing radiation, is important and necessary. They argue that this topic shows the student the relationship between physics and technology, but some productions point out that this topic is not addressed in classes due to the lack of preparation of teachers and lack of time, partly caused by the extensive content of physics. classic that should be treated. In addition, we found that within UNESP there is a shortage in the supply of specific disciplines that discuss aspects related to the Physics of Ionizing Radiation. Given these findings, our work aims to reflect on the discourses produced by the participating students, about the meanings they attribute to the contents and phenomena of the scope of Ionizing Radiations and the possibilities for their teaching, through elements of Discourse Analysis line french. We opted for a research model with a qualitative approach, where we used questionnaires as data collection instruments in our study. For the analysis of these data, we took into account the theoretical contributions of Discourse Analysis from the French line, from the productions of Michel Pechêux and the works of Eni Orlandi, as well as the work of H.M.C Eijkelhof, a Dutch researcher who deals with conceptual issues of Physics of Ionizing Radiation. The analyzes indicated that there is no discipline that specifically discusses aspects related to the theme of the physics of ionizing radiation in the initial training courses at UNESP. Based on this observation, we developed a discipline that contemplated this content, since these are relevant and fundamental concepts that must constitute the initial training of undergraduates in physics, since this content is present in official documents as part of the content to be worked on in the basic cycle.

In relation to the meanings produced, we were able to verify a significant advance of the participants, since we identified in the speeches an advance over the course of the course, in which the answers became more structured, conceptually adequate and more authentic, without

being tied to the answers obtained exclusively of digital texts, derived from research on the web. We defend training capable of ensuring basic education with a professional who is prepared to deal with the challenges involved in teaching about ionizing radiation and radioactivity.

Keywords: Physics of Ionizing Radiation. Initial Teacher Education. Discourse Analysis

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| PNLD | Programa Nacional do Livro Didático |
| SI | Sistema Internacional |
| FRI | Física das Radiações Ionizantes |
| AD | Análise do Discurso |
| UE | Unidade de Ensino |
| BNCC | Base Nacional Comum Curricular |
| IES | Instituição de Ensino Superior |
| UNESP | Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” |
| CTSA | Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente |
| PLON | Physics Curriculum Development Project |
| USP | Universidade de São Paulo |
| UNICAMP | Universidade Estadual de Campinas |
| UFF | Universidade Federal Fluminense |
| TCLE | Termo de Consentimento Livre e Esclarecido |
| IBILCE | Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas |
| UMURP | Universidade Municipal de São José do Rio Preto |
| FAFI | Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| ICNIRP | Comissão Internacional de Proteção Contra a Radiação Não Ionizante |
| LC | Letramento Científico |
| DNA | Ácido Desoxirribonucleico |
| UV | Ultravioleta |
| EUA | Estados Unidos da América |

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01: TUBO DE CROOKES PRODUZINDO RAIOS CATÓDICOS NO ESCURO (A) E EM AMBIENTE ILUMINADO (B).

FIGURA 02: REPRESENTAÇÃO DE UMA VÁLVULA DE HITORFF.

FIGURA 03- RADIOGRAFIA DA MÃO DE BERTHA RÖNTGEN, FEITA EM DEZEMBRO DE 1895.

FIGURA 04: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM TUBO DE RAIOS-X.

FIGURA 05: UNIDADES UNIVERSITÁRIAS DA UNESP EM TODO ESTADO DE SÃO PAULO.

FIGURA 06: RADURA

FIGURA 07: GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS DE DIFERENTES NÚCLEOS ATÔMICOS.

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01: COLEÇÕES PNLD: 2018-2020 QUE APRESENTAM CONTEÚDOS DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES.

QUADRO 02: CONTEÚDOS E QUANTITATIVOS ENCONTRADOS NAS COLEÇÕES DO PNLD: 2018-2020

QUADRO 03: PRODUÇÕES RELACIONADAS ÀS PROPOSTAS DE ENSINO E RECURSOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES.

QUADRO 04: CONTEÚDOS DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES PROPOSTOS POR EIJKELHOF (1990).

QUADRO 05: INSTITUIÇÕES COM CURSOS DE FÍSICA LICENCIATURA NO ESTADO DE SÃO PAULO.

QUADRO 06: DISCIPLINAS IDENTIFICADAS QUE TRATAM DAS RADIAÇÕES IONIZANTES.

QUADRO 07: TÓPICOS DE RADIAÇÕES IONIZANTES NA EMENTA DE QUÍMICA GERAL.

QUADRO 08: TÓPICOS DE RADIAÇÕES IONIZANTES NA EMENTA DE FÍSICA IV.

QUADRO 09: DISPOSIÇÃO DOS TÓPICOS DE FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES NAS DUAS UNIDADES DA UNESP.

QUADRO 10: DISCIPLINAS MAPEADAS NOS CURSOS DE FÍSICA LICENCIATURA DA UNESP .

QUADRO 11: DADOS DOS PARTICIPANTES DA PESQUISA

QUADRO 12: SÍNTESE DOS CONTEÚDOS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS POR ENCONTRO

QUADRO 13: ASSUNTOS QUE OS ALUNOS GOSTARIAM QUE FOSSEM ABORDADOS NA DISCIPLINA POR SEXO

ÍNDICE ANALÍTICO

| | |
|---|-----|
| APRESENTAÇÃO | 19 |
| INTRODUÇÃO | 21 |
| CAPÍTULO 1. A FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES: UMA BREVE DESCRIÇÃO HISTÓRICA E CONCEITUAL | 27 |
| 1.1. AS ORIGENS DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES | 27 |
| 1.2. EXPERIMENTOS DA GÊNESE DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES E DA RADIOATIVIDADE | 30 |
| 1.3. ASPECTOS CONCEITUAIS ACERCA DOS RAIOS X: CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO | 33 |
| 1.4. PRODUÇÃO DE RAIOS X: RAIOS X DE FREAMENTO E CARACTERÍSTICOS | 35 |
| 1.5. BECQUEREL E A “DESCOBERTA” DA RADIOATIVIDADE. | 36 |
| 1.6. MARIE E PIERRE CURIE: DETECÇÃO DE NOVOS ELEMENTOS RADIOATIVOS | 38 |
| 1.7. O CONCEITO DE ELEMENTO QUÍMICO, ISÓTOPO, NUCLÍDEO E RADIONUCLÍDEO | 40 |
| 1.8. DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR | 41 |
| 1.9. IRÈNE CURIE E FREDERIC JOLIO: DESCOBERTA DA RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL | 42 |
| 1.10. LEI DO DECAIMENTO RADIOATIVO | 44 |
| 1.11. ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA RADIOATIVA | 45 |
| CAPÍTULO 2. OS CONTEÚDOS DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES E DA RADIOATIVIDADE ABORDADOS NO PROGRAMA NACIONAL DO LIVRO E DO MATERIAL DIDÁTICO (2018-2020) E NAS PRODUÇÕES ACADÊMICAS EM ENSINO DE CIÊNCIAS. | 47 |
| CAPÍTULO 3. A CONSTRUÇÃO DO CURRÍCULO DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES NOS CURSOS DE FÍSICA DA UNESP | 57 |
| CAPÍTULO 4. ASPECTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA | 71 |
| 4.1. A NATUREZA DA PESQUISA | 71 |
| 4.2. O LOCAL DE REALIZAÇÃO | 72 |
| 4.3. O DOCENTE | 73 |
| 4.4. OS ESTUDANTES MATRICULADOS E COLABORADORES DO ESTUDO | 74 |
| 4.5 A COLETA DOS DADOS – O USO DE QUESTIONÁRIOS E GRAVAÇÕES DAS AULAS | 99 |
| 4.6 CONSIDERAÇÕES ACERCA DOS ELEMENTOS DA ANÁLISE DO DISCURSO | 101 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS DAS ATIVIDADES IMPLEMENTADAS | 107 |
| 5.1. A AULA 01 – PRÉ-AULA E QUESTIONÁRIO INICIAL | 107 |
| 5.2. A AULA 02 – MODELOS ATÔMICOS | 120 |

| | |
|---|-----|
| 5.3. A AULA 03 – CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS SOBRE RADIAÇÃO E RADIOATIVIDADE | 125 |
| 5.4. A AULA 04. RAIOS X E AS UNIDADES DE RADIAÇÕES | 131 |
| 5.5. A AULA 05. RADIOISÓTOPOS E DECAIMENTO RADIOATIVO | 135 |
| 5.6. A AULA 06. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA | 142 |
| 5.7. A AULA 07. ACIDENTE DE CHERNOBYL | 146 |
| 5.8. A AULA 08. PROJETO MANHATTAN | 154 |
| 5.9. A AULA 09. BOMBAS NUCLEARES | 165 |
| 5.10 AULA 10. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES IONIZANTES | 173 |
| 5.11 AS AULAS 11 E 12 – PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E A ABORDAGEM CTSA NO ENSINO DAS RADIAÇÕES | 180 |
| 5.12 A AULA 13. GAMEFICAÇÃO | 185 |
| 5.13 A AULA 14. PESPECTIVA DO RISCO | 190 |
| 5.14 AVALIAÇÃO FINAL DA DISCIPLINA | 193 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 198 |
| REFERÊNCIAS | 202 |
| FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL | 216 |
| ANEXO I | 221 |
| ANEXO II | 223 |
| ANEXO III | 225 |
| ANEXO IV | 226 |
| ANEXO V | 227 |
| ANEXO VI | 229 |
| ANEXO VII | 233 |
| ANEXO VIII | 238 |
| ANEXO XIX | 244 |
| ANEXO X | 247 |

APRESENTAÇÃO

O ser humano possui um desejo primitivo de perpetuar seus próprios genes, sobreviver ao tempo, atravessar as gerações. A crença de perpetuação genética acaba sendo uma falácia quando notamos que após três gerações, os antepassados caem no ostracismo das gerações subsequentes (provavelmente o leitor dessa produção sequer conheceu seu bisavô ou bisavó). Além de falaciosa, é extremamente injusta com seu progênito a responsabilidade de deixar um legado em nome de seu antecessor. O nosso sucesso deveria depender única e exclusivamente das nossas ações!

É provável que, uma forma mais eficaz de reconhecimento seja a realização de grandes feitos, como por exemplo se destacar dentro de uma área profissionalmente. A real motivação dessa tese é a realização de um sonho de infância que, com o tempo se mostrou um desejo natural: tornar-me um grande cientista. É óbvio que a noção do que é ser um cientista foi sendo modificada conforme eu amadurecia, passando para o status de pesquisador. E por que seguir essa carreira? Desde criança sempre fui muito curioso, sempre perguntava para a minha mãe o porquê das coisas; queria saber de tudo! Mas talvez a pergunta chave que me fez me tornar um pesquisador foi “Quem é a pessoa que sabe de tudo no mundo, mamãe?” ao passo que ela me respondeu que “ninguém sabe tudo”. Naquele dia eu, no alto dos meus sete anos, tive a petulância de achar que essa pessoa seria eu. Todavia, minha mãe estava certa e era impossível uma pessoa saber tudo sobre todas as coisas. Entretanto, e sobre a natureza? E por que não tentar saber sobre as coisas que todo mundo achava difícil? Será que isso poderia me fazer mais “inteligente”? Descobri os cientistas e tão rapidamente o famoso prêmio Nobel, entregue àqueles que dedicaram anos de estudos para que conseguissem ser reconhecidos pelos seus pares. Queria ainda mais ser um cientista e ganhar um prêmio Nobel; ensaiava até o discurso para o rei da Suécia. Porém, o pedantismo me derrubou diversas vezes até que eu percebi que teria de ser mais dedicado e esforçado do que “inteligente” para chegar longe e ser reconhecido como alguém que tivesse feito algo importante e deixasse um legado.

O sonho do Nobel desapareceu no primeiro dia do curso de bacharelado em Física Biológica. Entrei na lista de espera e a minha primeira aula foi de cálculo, na qual cheguei atrasado por não encontrar a sala e deparo-me com uma aula sobre limite. Pensei “que diabos é isso?”. No outro dia já estava a ligar para minha mãe e informar o desejo de trancar o curso. Ela disse que não e pediu para a Natália me ligar e convencer a ficar, bem como um antigo professor de física do ensino médio (a quem dedico essa tese) que me acalmou e mostrou que o caminho

seria difícil. Realmente foram seis longos anos de graduação, diversas vezes pensei em desistir, mas finalmente concluí o bacharelado.

Já tinha realizado o sonho de infância! Em 2014 eu era, oficialmente, um cientista. E agora? Bem, o próximo passo era tentar o mestrado. E realmente ficou somente na tentativa, já que não fui aprovado no processo de seleção. Um dos dias mais tristes da minha vida foi, sem dúvidas, fundamental para que eu escrevesse essa tese. Como não queria perder o vínculo com a Universidade, pedi o reingresso como portador de diploma e resolvi cursar a licenciatura, curso recém-criado. Meu pedantismo voltava à tona mais uma vez. Acreditava que as disciplinas pedagógicas eram apenas “enrolação” e que nada ajudariam na minha formação. Queria somente o diploma para poder dar aulas e prestar novamente o mestrado. Todavia, uma das primeiras disciplinas que tive foi com meu orientador. Tínhamos uma relação de amor e ódio. Por um lado, ele mostrou que existia a área de pesquisa em ensino de física, as pesquisas que poderiam ser realizadas, o caminho que poderia ser trilhado. Porém, ele insistia no discurso de que quem era remanescente do bacharelado não tinha outra opção, senão ir para a licenciatura para conseguir se inserir no mercado de trabalho. Após alguns meses, e várias disciplinas, ele me convidou para participar do seu grupo de pesquisa, o que de cara eu neguei. Isso quase custou meu futuro, mas me negava a trabalhar com alguém que por vezes apresentava um discurso vilipendioso quanto a minha formação.

Foram necessários dois anos até que eu o procurasse e perguntasse se o convite para participar do seu grupo de pesquisa ainda estava de pé. Ele me aceitou no grupo e desde 10 de março de 2016 sou um dos integrantes da Equipe de Educação em Física “Susana Lehrer de Souza Barros”. Juntos formamos uma boa dupla, provavelmente porque temos ambições parecidas, gostamos de excelência em nossas produções. Isso possibilitou até a entrega dessa tese, três artigos, um capítulo de livro e diversas participações em eventos da área de ensino de física. Mais que isso, com a nossa parceria obtive minha titulação de mestre. Nessa etapa, desenvolvemos uma dissertação que tinha como objetivo investigar as interpretações que os estudantes da educação básica apresentavam sobre física das radiações a partir da leitura de textos de divulgação científica. Todavia, identificamos que havia uma questão importante a ser tratada: o professor de física que auxiliou na implementação das atividades não compreendia de maneira satisfatória os fenômenos relacionados às radiações. Assim, para o doutorado, pensamos em uma disciplina voltada a formação inicial de futuros professores de física, a fim de analisar, a partir dos discursos produzidos por licenciandos em física, quais os sentidos que eles atribuem aos fenômenos relacionados às radiações. Podemos então admitir que o objetivo da tese foi concebido a partir da constatação de que se faz necessária a inserção de tópicos

relacionados à física das radiações na formação inicial de licenciandos em física. A seguir, iniciaremos a exposição dos conceitos associados à temática de nossa tese.

INTRODUÇÃO

Entre o final do século XIX e o início do século XX, surgiram fenômenos que revolucionaram a Física Clássica e abriram caminho para novas áreas, tais como a Relatividade e a Física Quântica. A partir da proposição de uma partícula elementar e da estimativa tanto da carga quanto da sua massa (relação carga/massa do elétron), dos experimentos de Röntgen e, conseqüentemente, da detecção de seus “novos raios” e dos trabalhos de Becquerel e do casal Curie um novo campo da ciência começou a ser concebido: o da Física das Radiações Ionizantes (doravante FRI).

Segundo Segrè (1987), Wilhelm Röntgen enviou dados preliminares relacionados aos seus novos raios a diversos colegas, entre eles Henri Poincaré, um matemático que havia participado de debates relacionados aos raios catódicos estudados por Julius Plücker e Eugen Goldstein. Por seis semanas, o físico viveu em seu laboratório buscando entender o fenômeno que havia observado. De acordo com Segrè;

Na noite de 8 de novembro de 1895, Röntgen estava trabalhando com uma válvula de Hittorf que tinha coberto totalmente com cartolina negra. A sala estava inteiramente às escuras. A certa distância da válvula havia uma folha de papel, usada como tela, tratada com platinocianeto de bário. Para seu espanto, Röntgen viu-a brilhar, emitindo luz. [...] Descobriu um “novo tipo de raio”, conforme ele mesmo explicou em sua primeira publicação sobre o assunto. (p.20-21)

Em razão de seus estudos, Röntgen é laureado com o primeiro prêmio Nobel de Física devido às suas contribuições nos estudos das radiações. Todavia, esse era apenas o início dos estudos acerca desse novo fenômeno.

A radioatividade, apesar de não ter essa designação, passou a atrair olhares de todas as partes, inclusive por Henri Becquerel logo após a detecção de Röntgen. Conforme aponta Segrè (1987), Becquerel foi capaz de constatar que a radiação emitida pelo urânio não apenas escurecia as chapas fotográficas, mas também era capaz de ionizar gases, convertendo-os em condutores. Dessa maneira, foi possível quantificar a atividade de uma amostra medindo a ionização que um determinado gás sofria.

O passo seguinte nessa nova revolução foi dado logo após as publicações de Becquerel por Marie e Pierre Curie. De acordo com Strathern (2000, p.38), “Marie Curie havia acompanhado os experimentos de Röntgen e Becquerel com grande interesse, discutindo-as

com Pierre como sempre”. Conforme aponta Segrè (1987), em dezembro de 1897, Marie solicitou que seu marido sugerisse um tema para sua tese de doutorado, ao passo que Pierre recomendou o estudo do “novo fenômeno” descoberto por Becquerel. Marie iniciou seus trabalhos estudando a radiação emitida por sulfato de potássio uranilo, realizando uma réplica do experimento de Becquerel. Em seguida, começou a estudar diferentes compostos de urânio, entre eles alguns sais de Urânio e a pechblenda (forma mineral do óxido de urânio).

Ao longo de seus experimentos, Marie Curie notou que só uma coisa afetava a quantidade de radioatividade: a quantidade de urânio presente na amostra. A partir dessa constatação;

[...] Marie Curie confirmou a descoberta de Becquerel de que a emissão dos raios é uma propriedade atômica do urânio. Decidiu, assim, examinar “todos os elementos então conhecidos” e descobriu que somente o tório emitia os raios “semelhantes aos do urânio”. Nesse ponto, depois de descobrir que o urânio não era o único elemento que emitia radiação espontânea, Madame Curie propôs a palavra radioatividade para esse fenômeno. (SEGRÈ, 1987, p.35-36)

Nas palavras de Strathern (2000, p.40), “a fonte da radioatividade não eram os compostos de urânio: essa propriedade pertencia aos próprios átomos de urânio”. A partir dessa constatação, surgiu uma nova dúvida: seria essa propriedade exclusiva do urânio? Para responder essa questão, Marie recorreu a sais de elementos que possuíam peso atômico próximo do urânio, como o tório. Ao reproduzir o mesmo experimento com o óxido de tório, Marie não teve dúvidas: o tório também era radioativo.

Essa confirmação (emissão de radiação do tório) provocou o interesse de Marie que, junto com o marido Pierre Curie, possibilitou elucidar a natureza complexa da radiação nuclear. Pelo trabalho desenvolvido junto com Becquerel, Marie e Pierre foram agraciados com o prêmio Nobel de Física em 1903, juntamente com Becquerel.

No que diz respeito ao ensino da FRI na formação inicial de professores, identificamos poucos trabalhos (BRUGLIATO, 2020; SILVA, 2017; BEZ, ALEXANDRE E COSTA, 2013; SORPRESO, 2008; KELECOM E GOUVEA, 2002; EIJKELHOF, 1990) que contemplam conteúdos relacionados aos fenômenos da FRI e da radioatividade. Esse conjunto de estudos convergem na busca de entender diferentes aspectos do ensino junto a estudantes de cursos de física.

Brugliato (2020) elaborou uma Unidade de Ensino (UE) na qual convidou licenciandos em física a efetuarem a leitura de trechos extraídos de livros didáticos e de textos de divulgação científica para, em seguida, responderem a questionários relacionados à Física Nuclear. Em

suas análises, a autora concluiu que alunos que participaram, aparentemente alteraram suas concepções quanto à utilização de textos de divulgação científica, já que eles tiveram a percepção de que esse tipo de texto poderia ser utilizado em sala de aula, uma vez que, na percepção deles, tratava-se de uma leitura agradável.

Silva (2017) construiu uma UE de onze aulas com duração total de 150 minutos cada, implementando a proposta em uma disciplina obrigatória de um curso de Física Licenciatura, na qual abordou aspectos do funcionamento dos aparelhos e exames de radiografia, tomografia computadorizada, tomografia por emissão de pósitrons e ressonância magnética, bem como de que maneira se situa em suas representações a possibilidade de trabalhar esse tema no Ensino Médio. Os resultados apontaram que os licenciandos que participaram da pesquisa produziram representações que indicaram no sentido de trabalhar aspectos relacionados ao funcionamento dos aparelhos e exames de diagnóstico médico por imagem, desde que ocorram problematizações associadas a questões sócio-históricas e fomentem a reflexão e questionamentos por parte dos estudantes.

Com o objetivo de conhecer as concepções dos alunos de um curso de Ciências da Natureza, com Habilitação em Física, sobre a radioatividade, Bez, Alexandre e Costa (2013) aplicaram um questionário para 30% dos alunos do curso do Instituto Federal de Santa Catarina, campus de Araranguá. A maioria dos alunos apresentou desconhecimento sobre o fenômeno da radioatividade e aspectos relacionados, tais como radioatividade, onda eletromagnética, raios-x e desconhecimento quanto ao funcionamento de aparelhos de raios-x e fornos micro-ondas. Os autores sugerem a execução de atividades que tragam evolução conceitual dos discentes, como, por exemplo, realização de cursos de extensão de Formação Inicial e Continuada acerca desses conceitos.

Com vistas a compreender o imaginário de licenciandos em Física, a respeito da inclusão da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, Sorpreso (2008), acompanhou uma turma de licenciandos que cursaram a disciplina *Prática de Ensino de Física e Estágio Supervisionado* no primeiro semestre de 2005, no período diurno, na Faculdade de Educação da Universidade Estadual de Campinas. Dentro da temática *Questão Nuclear*, os licenciandos prepararam *episódios de ensino* nos quais deveriam estar presentes uma das seguintes abordagens: História da Ciência; Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente; Resolução de Problemas e Linguagens no Ensino de Ciências. A autora constatou que a Física Nuclear é um assunto muito recorrente nos meios de comunicação e que, dessa forma, seu estudo seria uma forma de conectar a Física da escola com a vida do estudante, permitindo ao aluno uma compreensão mais crítica acerca desse fenômeno. Além disso, segundo a autora, os episódios

de ensino contribuíram significativamente para que os licenciandos pensassem sobre suas próprias concepções de ciência e educação.

Na perspectiva de Kelecom e Gouvea (2002) a percepção da radioatividade por estudantes universitários é muito superficial. Os autores aplicaram questionários com alunos da Universidade Federal Fluminense (UFF), inscritos numa das diversas disciplinas de Radiobiologia ministradas pelos autores. Os alunos eram oriundos de 9 cursos de graduação: Ciências Biológicas, Enfermagem, Farmácia, Física, Medicina, Medicina Veterinária, Odontologia, Nutrição e Psicologia, e 2 cursos de pós-graduação: Biologia Marinha (PGBM) e Ciência Ambiental (PGCA). Ao final da pesquisa, os autores concluíram que as informações dos estudantes acerca das radiações ionizantes provêm da imprensa, raramente de estudos, fazendo com que ela seja desconhecida, temida e rejeitada. Em geral eles não sabiam defini-la, sequer parcialmente, nem conhecem a maioria das suas aplicações. Aceitam a existência de radioatividade natural no solo e a execução de testes nucleares ambientalmente limpos e seguros para todas as formas de vida.

Eijkelhof (1990), por sua vez, apresenta em sua obra uma extensa coletânea de dados acerca dos conceitos de radiações e radioatividade, passando pela proposta educacional dos Países Baixos, pelas concepções de estudantes da educação básica, ensino superior e especialistas para corroborar a prerrogativa de que o ensino das radiações ionizantes é de suma relevância para a formação do cidadão, visto que esses conceitos se fazem presentes no cotidiano da população.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, desenvolvemos uma disciplina para o curso de licenciatura com ênfase nos fenômenos conceituais da radioatividade e da FRI. Por essa razão, efetuamos um estudo relacionado ao currículo dos cursos de física. Sabemos que o currículo desempenha um papel fundamental na formação de qualquer profissional. No curso de Física Licenciatura é imprescindível um currículo que dê conta não somente da área do conhecimento, mas também das áreas relativas ao desenvolvimento de novas tecnologias, bem como suas aplicações, privilegiando o desenvolvimento crítico, social, histórico-cultural e, ao mesmo tempo, proporcionando ao licenciando uma reflexão de tudo que engloba o universo da Física e o capacitando para sua futura carreira.

Desta maneira, elaborei uma proposta de ensino que versa sobre a FRI e o fenômeno da Radioatividade, a qual foi implementada junto a estudantes do curso de física licenciatura da UNESP (campus São José do Rio Preto), com o objetivo de **refletir sobre os discursos produzidos pelos estudantes participantes, acerca dos sentidos que atribuem aos conteúdos e fenômenos do âmbito das Radiações Ionizantes e às possibilidades para o seu**

ensino, por meio de elementos da Análise de Discurso de linha francesa. Perante isso, busquei responder os seguintes problemas de pesquisa:

1) Quais sentidos são atribuídos, por um grupo de estudantes de nível superior, aos conteúdos e fenômenos do âmbito das Radiações Ionizantes, bem como às possibilidades para o seu ensino?

2) Em que medida uma disciplina, que versa sobre Radiações Ionizantes, ofertada para a formação inicial de professores de física, proporciona aos estudantes a atribuição de sentidos aos conteúdos nela abordados?

A pesquisa que apresento originou-se de minha experiência no mestrado, na qual investiguei o ensino da física das Radiações Ionizantes e do Fenômeno da radioatividade junto alunos do Ensino Médio. Naquele momento, uma questão me pareceu relevante e emergiu de uma conversa informal com um dos professores da rede pública que colaborou com minha investigação.

O professor afirmou nunca ter estudado a respeito daquele conteúdo na universidade. Isso me motivou a um novo trabalho, agora com foco na formação dos licenciandos em física. Diante disso, o objetivo maior foi o de proporcionar aos estudantes, em formação inicial, uma disciplina que contemple a temática supracitada e que possibilite ao futuro professor condições iniciais para discutir assuntos como irradiação de alimentos, acidentes nucleares e proteção radiológica com alunos da Educação Básica.

Nesse sentido, a pesquisa que relatarei se justifica pelo fato de entender que se faz necessário possibilitar aos futuros professores um diálogo entre a teoria, a prática e reflexão de um conteúdo que é contemplado pelo Currículo Paulista. À vista disso, elaboramos e ofertamos uma disciplina, em caráter optativo, que discutisse a FRI e o fenômeno da radioatividade com aspectos conceituais e pedagógicos, com o objetivo de identificar quais os sentidos são atribuídos por futuros professores de física.

Para a investigação, elaboramos um conjunto de quinze aulas que foram implementadas, junto a estudantes de um curso de Formação Inicial de professores de Física de uma universidade pública do estado de São Paulo, e analisadas sob o referencial teórico e analítico da Análise do Discurso da linha Francesa.

Dessa maneira, o texto que apresento foi dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo abordaremos aspectos históricos e conceituais da FRI e do fenômeno da Radioatividade. O capítulo foi desenvolvido a partir da perspectiva dos experimentos que precederam o descobrimento dos raios X em 1895 por Röntgen, passando pelos trabalhos de

Becquerel e de Marie Curie que possibilitaram compreender o fenômeno da radioatividade natural de determinados elementos químicos (como o urânio, o rádio e o polônio). Finalizo com as proposições de Irène Curie e Jean Frederic Joliot que culminaram no entendimento da radioatividade artificial. Paralelamente aos acontecimentos e às descobertas históricas, apresento os conceitos físicos e relações matemáticas para auxiliar o leitor na compreensão desses tópicos.

O segundo capítulo é reservado a apresentação das produções acadêmicas dos últimos dez anos e os conteúdos relacionados à FRI e aos fenômenos da Radioatividade presentes no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) do triênio 2018-2020. Nesse capítulo, realizei um levantamento para identificar os principais tópicos abordados nas produções científicas da última década e verificar se existem correlação entre as produções e os conteúdos abordados na Educação Básica.

No terceiro capítulo, realizei um levantamento nos currículos dos cursos de Física Licenciatura da UNESP com o objetivo de analisar quais os conteúdos relativos à Física das Radiações Ionizantes encontram-se presentes na formação inicial dos professores de física dessa instituição.

O quarto capítulo foi dedicado ao dispositivo analítico utilizado na pesquisa. Vale destacar que esse capítulo foi desenvolvido a partir da AD de linha francesa, por meio das produções de Eni Orlandi.

O capítulo cinco foi destinado à fundamentação teórica da proposta didática e a implementação dela. Neste capítulo tratei de descrever a proposta didática, bem como relatar a instituição colaboradora, os participantes e aspectos do docente responsável pela implementação da proposta, bem como a implementação das atividades.

Finalmente, o capítulo seis apresenta as análises realizadas, bem como as considerações a que chegamos. Desejamos a todos aqueles que tenham interesse nessa produção, uma boa leitura!

CAPÍTULO 1. A FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES: UMA BREVE DESCRIÇÃO HISTÓRICA E CONCEITUAL

No capítulo 1, optei por apresentar uma breve introdução teórico-conceitual da FRI e da Radioatividade com o intuito de produzir e disponibilizar, aos licenciandos em física, um material que contemplasse os conteúdos específicos da FRI, bem como aspectos da história de sua constituição. Defendo que essa constituição (histórico-conceitual) é relevante quando

pensamos em atingir o público constituído por futuros professores de física, uma vez que, há na literatura da área de Educação em Ciências diversos trabalhos que realçam o valor histórico das construções acerca dos fenômenos físicos contemplado nessa tese, com descrições minuciosas e fatos que passam despercebidos em aulas de história da Física. Concordo com El-Hani (2006) que:

É preciso enfatizar, ainda, que não se trata somente de incluir uma abordagem dos processos de construção do conhecimento científico no Ensino de Ciências, mas de considerá-los no contexto histórico, filosófico e cultural em que a prática científica tem lugar. Ou seja, não é o caso de focar-se somente a participação de alunos e professores em atividades simuladas de investigação científica, sem tratamento explícito e crítico das dimensões históricas e filosóficas envolvidas em tal investigação (p. 3).

Destacar, atenuar e exhibir esses aspectos é algo que me parece extremamente importante para o futuro professor de Física, uma vez que situar e contextualizar o estudante dentro do momento histórico pode contribuir para o processo de ensino-aprendizagem.

1.1. AS ORIGENS DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

A física entre o final do século XIX e início do século XX pode ser definida por uma palavra: *revolucionária*. De acordo com Martins (2012) a detecção das FRI e da radioatividade ocorreu de maneira surpreendente, pois, até aquele momento, fenômenos físicos eram descritos por hipóteses ou teorias, embora os cientistas logo buscassem atrelar esses conhecimentos com concepções já vigentes. No caso da radioatividade, Martins (2012) expõe que esse novo fenômeno observado permitiu que a própria visão de mundo dos pesquisadores fosse abalada pelos novos fatos, contribuindo para que os cientistas se dirigissem aos seus laboratórios procurando conceber e assimilar esse mais novo acontecimento no campo da ciência.

Segundo Segrè (1987) a história da Física das Radiações teve início por volta do ano de 1895, uma vez que, durante dois ou três anos dessa época, os físicos deram uma guinada decisiva com algumas comprovações experimentais que ampliaram o conhecimento microscópico do mundo atômico. Tais comprovações só se tornaram possíveis graças ao advento de uma tecnologia que transformou os laboratórios de física e química: o vácuo. Nos laboratórios primitivos dos anos de 1895, o vácuo, tão importante para os progressos feitos nas pesquisas sobre o átomo, era criado por bombas primitivas e utilizado em experimentos que

envolviam descargas elétricas em gases, que resultaram nas identificações dos raios X e do elétron (SEGRÈ, 1987).

Entretanto, vale destacar que a física das radiações, bem como o fenômeno da radioatividade (e por consequência os estudos atômicos) não estavam entre os assuntos de maior destaque no final do século XIX e começo do século XX. De acordo com Segrè (1987), ainda que a química e a física fossem tidas como disciplinas irmã até aquele momento, os estudos que estavam sendo desenvolvidos diziam respeito a liquefação dos gases; a mensuração de calores específicos, ondas eletromagnéticas e os fenômenos de óptica, tal como a difração e a polarização. Ainda segundo Segrè (1987) existiam trabalhos com interesse menor, tais como dissociação iônica, conceito de íons em solução, e alguns pouco estudos relacionados a descargas elétricas em gases. Entretanto, nenhum cientista dispunha-se seriamente em elaborar modelos atômicos. Segundo o autor, os cientistas ainda não tinham adquirido pleno reconhecimento do átomo como estrutura fundamental na constituição da matéria.

Existia, segundo Segrè (1987), certo ceticismo por parte dos cientistas quanto a crença na realidade dos átomos. De acordo com o autor;

Entre os físicos, um dos mais notáveis céticos com relação à “hipótese” atômica foi Ernst Mach (1838-1916), que era também afamado de psicólogo. Na edição de 1906 de *The Analysis of Sensations*, Mach faz referências aos átomos e moléculas hipotéticos e artificiais da física e da química e, sem negar “o valor desses instrumentos para seus propósitos específicos e limitados”, comparou-os aos símbolos da álgebra. (SEGRÈ, 1987, p.7)

Há de se destacar, sobretudo, que outros cientistas desacreditavam do modelo atômico, tal como Max Planck que só passou a adotá-la quando se tornou essencial na fundamentação teórica de sua lei sobre radiação de corpo negro.

É importante destacarmos que alguns elementos, do ponto de vista conceitual, contribuíram significativamente para que os raios X fossem detectados por Röntgen em 1895. Segundo Martins (2012) o estudo daquilo que se conhece como raios catódicos tem seu princípio na metade do século XIX, mais especificamente em 1855, quando Heinrich Geissler desenvolveu um equipamento capaz de criar um vácuo em um tubo, permitindo o estudo de gases rarefeitos sob a ação de descargas elétricas.

Julius Plücker, em 1858, deu sequência nos estudos de Geissler. Segrè (1987) relata que Plücker teve a ideia de aproximar um ímã de um tubo de vácuo para observar o que aconteceria com a descarga elétrica. Ao realizar essa manobra, Plücker percebeu que a descarga sofria um desvio devido à presença do campo magnético do ímã. Posteriormente ele notou que

além do desvio era possível observar uma fosforescência verde no vidro, próximo ao cátodo e com o auxílio de um ímã, conseguiu deslocar as manchas de fosforescência, assim como tinha feito com a descarga elétrica.

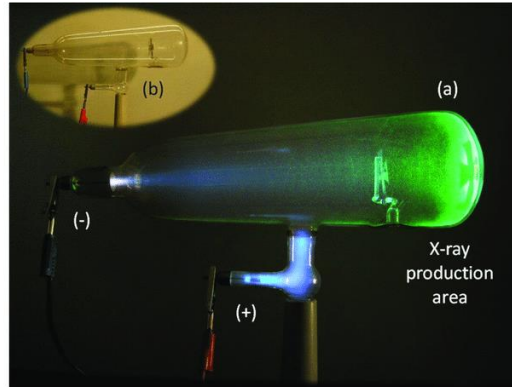
No ano seguinte, um aluno de Plücker, Johann Hittorf percebeu algo que seu professor não havia notado: a presença de uma sombra projetada de um objeto colocado em frente ao cátodo, o que segundo Segrè (1987) indicava claramente que a descarga se originava no próprio cátodo. Surge então, um novo fenômeno físico, considerado um predecessor que contribuiria significativamente para a derradeira compreensão dos raios X: os raios catódicos (em alemão, *Kathodestrahlen*), que segundo Martins (2012), foi batizado em 1876 pelo físico Eugen Goldstein.

Após a sua detecção, inúmeras perguntas foram feitas a propósito desse novo raio. Dentre elas, a mais pertinente foi: qual a natureza desses raios? Conforme descreve Segrè;

Alguns diziam que eram corpúsculos, partículas projetadas do cátodo; outros acreditavam tratar-se de ondas. Por estranho que possa parecer, as opiniões se dividiam segundo as nacionalidades. Em 1892, Hertz afirmou ter prova experimental de que os raios catódicos não poderiam ser partículas, logo, tinham que ser ondas. Gustav Heinrich Wiedemann (1826-1899), Goldstein e todos os físicos alemães concordavam. Mas na Inglaterra, Crookes insistia em que esses raios eram partículas carregadas eletricamente (Crookes chamou-os de “matéria radiante”) e alguns físicos ingleses – Kelvin, J.J Thomson, entre outros – insistiam em afirmar que eram “partículas” (1987, p.12).

Tal qual apresenta Martins (2012), aprendemos atualmente que os raios catódicos são simplesmente um fluxo de elétrons que se originam dentro de tubos cheios de gás rarefeito, também chamados tubos de Crookes (figura 01), ou seja, em harmonia com o que acreditavam os físicos ingleses. Essa confirmação só foi possível graças ao físico francês Jean Baptiste Perrin que em 1895, durante seu doutorado, demonstrou em um experimento que os raios catódicos eram partículas carregadas com cargas negativas.

Figura 01: Tubo de Crookes produzindo raios catódicos no escuro (a) e em ambiente iluminado (b).



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Crookes-tube-with-shadow-cross-in-use-X-rays-emerge-upon-impact-of-electrons-cathode_fig1_325342963

A luminescência esverdeada (raios catódicos) que aparece na parede do tubo de Crookes sempre aparece no lado oposto ao catodo. Alterando-se a posição do catodo e a do anodo, de todas as maneiras possíveis, os raios catódicos sempre aparecem em frente ao catodo. Assim, conclui-se que a luminescência é produzida por um feixe de partículas carregadas (elétrons, que só viriam a ser descobertos em 1897, por J.J Thomson) que sai do catodo, atravessa o tubo, e se choca com a parede de vidro. É inegável que a detecção do elétron foi importantíssima para os rumos que a ciência tomaria a partir do ano de 1897, bem como a relevância da determinação da constante carga-massa do elétron, determinada pela primeira vez em 1899. Entretanto, essas investigações acabaram sendo ofuscadas, de acordo com Segrè (1987), por uma outra, realizada no ano de 1895, feita por Wilhelm Röntgen ao anunciar um novo tipo de raio misterioso, o qual será tratado na próxima seção.

1.2. EXPERIMENTOS DA GÊNESE DA FÍSICA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES E DA RADIOATIVIDADE

Ao longo dos últimos 40 anos do século XIX diversas observações, teorias e hipóteses apontavam que vários pesquisadores passaram próximos da detecção dos raios X. De acordo com Anderson (1964) Goldstein, em um artigo de 1880 relata que seria possível excitar uma tela fluorescente, ainda que estivesse protegida dos raios catódicos. O mais intrigante é que nos quinze anos seguintes, nenhum cientista questionou como tal fenômeno poderia ocorrer. Anderson (1964) destaca ainda que o artigo de Goldstein foi publicado em inglês e alemão, permitindo que os pesquisadores envolvidos nesses estudos pudessem ter conhecimento sobre sua determinação.

Além de Goldstein; Hertz, Thomson e Lenard também registraram os raios X antes de Röntgen, embora não tenham tido a clareza de interpretar tal fenômeno como um novo tipo de raio. Entre os três Phillip Lenard talvez tenha sido o que mais se aproximou da (futura) detecção de Röntgen. Conforme destaca Martins (2012), Heinrich Hertz, em 1892, foi o primeiro cientista a retratar a característica que os raios catódicos possuíam de penetrar folhas finas de metal, quando produzidas dentro de um tubo de Crookes. Dando continuidade ao trabalho de seu professor, Lenard conseguiu construir tubos de Crookes com uma pequena janela de alumínio (espessura de aproximadamente 0,0025 mm), o qual permitiu a observação dos raios catódicos fora do tubo e estudá-los no ar ou em outros gases. Posteriormente esses raios ficaram conhecidos como raios Lenard. Lenard publica, em 1894 na revista alemã *Annalen der Physik*, suas primeiras observações, entre as quais se destacam:

1- Os raios Lenard eram capazes de impressionar uma chapa fotográfica.

2- Um disco de alumínio possuindo cargas elétricas em sua superfície era descarregado quando colocado no trajeto desses raios, mesmo quando este disco era colocado a uma distância maior que oito centímetros, que era o alcance máximo dos raios catódicos no ar.

3- Os raios sofriam deflexão continuamente por um campo magnético; isto é, alguns raios eram defletidos mais do que outros, e existiam alguns que não se defletiam.

O mais plausível é que Lenard estivesse detectando os efeitos e a ação dos raios X; todavia o cientista assumiu que se tratasse somente de raios catódicos e dessa maneira não se preocupou em continuar a investigar esse fenômeno. Essa tarefa coube a outro cientista, Wilhelm Röntgen.

Wilhelm Conrad Röntgen nasceu em Lennep, Alemanha, em 27 de março de 1845. Enquanto físico foi considerado com um bom físico, tendo trabalhado com cientistas como Rudolf Julius Emanuel Clausius que atuava na área de termodinâmica e August Adolph Eduard Eberhard Kundt que estudava fenômenos acústicos. Apesar de Röntgen ter tido experiências anteriores nessas duas áreas, seus trabalhos estavam mais diretamente relacionados à eletricidade. De acordo com Segrè (1987), Röntgen provou no ano de 1888 que a corrente obtida por cargas em movimento era a mesma da corrente em um fio condutor; fato que o próprio autor destaca em sua obra, não ser tão óbvio para aquela época. Até aquele momento, Röntgen já havia escrito quarenta e oito trabalhos (todos esquecidos atualmente). Todavia o quadragésimo nono se tornaria o mais relevante de toda a sua vida. Na noite de sexta-feira, 8 de novembro de 1895, Röntgen trabalhava em seu laboratório com uma válvula de Hitorff (figura 02) revestida com uma cartolina negra, além é claro de não haver nenhuma luminosidade na sala.

Figura 02: Representação de uma válvula de Hitorff



Fonte: <https://teslaresearch.jimdofree.com/x-rays/>

Encontrava-se, mais adiante em relação à válvula, uma folha de papel, utilizada como anteparo, tratada com platinocianeto de bário. Tamanha foi a surpresa de Röntgen quando observou seu anteparo brilhando numa luminescência esverdeada, ainda mais porque uma cartolina negra cobria seu tubo de raios catódicos, então algo deveria estar atingindo seu anteparo. Conforme descreve Segrè;

Surpreso e perplexo com o fenômeno, Röntgen decidiu pesquisá-lo mais a fundo. Virou a tela de modo a que o lado sem platinocianeto de bário ficasse voltado para a válvula; mesmo assim, a tela continuava a brilhar. Ele então afastou a tela para mais longe da válvula e o brilho persistiu. Depois colocou diversos objetos entre a válvula e a tela e todos pareceram transparentes. Quando sua mão escorregou em frente a válvula ele viu ossos na tela. Descobriu um novo tipo de raio, conforme ele mesmo explicou em sua primeira publicação sobre o assunto. (1987, p.21)

No dia 1º de janeiro de 1896, Röntgen já estava encaminhando algumas dezenas de cópias dos seus resultados prévios, acompanhados de radiografias – incluindo a mais famosa delas, a mão de sua esposa (figura 03) – acerca do fenômeno que acabara de descobrir. De acordo com Martins (2012), não se sabe ao certo quantas pessoas receberam essa primeira leva de resultados, entretanto é notório o sucesso dessa tática, uma vez que seu trabalho rapidamente começou a ser lido e comentado em todas as comunidades científicas.

Figura 03- Radiografia da mão de Bertha Röntgen, feita em dezembro de 1895.



Fonte: Martins (2012, p.32)

Ao estudar as propriedades desse novo raio, Röntgen, segundo Kaplan (1962) notou que fluorescência diminuía (embora não se extinguisse enquanto houvesse radiação) quando se colocavam materiais opacos à luz entre o tubo de Crookes e o anteparo, demonstrando que os raios X podiam atravessar componentes que não permitem a passagem natural de luz visível. Ainda, segundo o autor, em investigações futuras Röntgen observou que os raios X podem sofrer reflexão, refração e difração, e consistiam em radiação eletromagnética, porém de comprimento de onda muito menor.

Como descreve Segrè (1987), Röntgen escreveu dois artigos a respeito dos raios X, após a sua investigação, em 1896 e 1897, para então se debruçar sobre seus velhos temas, deixando para os cientistas mais jovens e menos preocupados essa tarefa. Tamanha foi sua contribuição no campo das radiações que, no ano de 1901, Röntgen foi agraciado com o prêmio Nobel de física.

1.3. ASPECTOS CONCEITUAIS ACERCA DOS RAIOS X: CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO

Os raios X são ondas eletromagnéticas de alta frequência que são produzidos quando os elétrons excitados de grande velocidade se chocam com um obstáculo sólido. De acordo com a teoria da eletrodinâmica clássica, uma partícula carregada em movimento emite radiação eletromagnética quando sofre uma aceleração; a detenção brusca de um elétron produz um impulso de radiação que toma a forma de um raio X. Na prática, os raios X são produzidos as

vezes em um tubo de raios catódicos com um gás de baixa pressão em que se é colocado um anticatodo metálico em frente ao catodo.

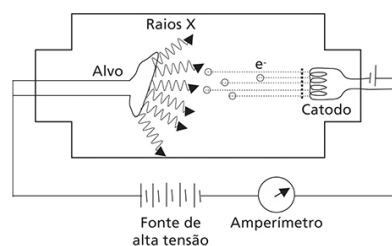
Uma das propriedades mais importantes dos raios X é ao seu forte poder de penetração. O poder de penetração dos raios X em uma substância depende da natureza fundamental na produção de raios X. Existem duas possibilidades: Em um deles, os raios X produzidos, chamados de *raios de freamento*, apresentam um espectro contínuo de energias, e no outro, chamados de *raios X característicos ou de fluorescência*, um espectro de linhas ou de raios, com energias bem definidas.

A produção de raios X pode ser compreendida do ponto de vista clássico, uma vez que relaciona conceitos da física clássica como colisões, conservação de energia, termologia e eletrodinâmica. Além disso, a escolha do material que vai ser utilizado como alvo para a produção de raios X é importante, uma vez que os materiais devem possuir pontos de fusão elevados. De acordo com a Okuno (2010)

Em um tubo de raios X, a maioria dos elétrons incidentes sobre o alvo perde energia cinética de modo gradual nas inúmeras colisões, convertendo-a em calor. Essa é a razão pela qual o alvo deve ser constituído por um material de alto ponto de fusão, como o tungstênio (cujo ponto de fusão é de 3695 K) ou o molibdênio (cujo ponto de fusão é de 2896 K) (p. 77).

A figura 04 apresenta um esquema simplificado de um aparelho de produção de raios-X.

Figura 04: Diagrama simplificado de um tubo de raios-X



Fonte: Okuno (2010, p. 75)

A figura apresenta um esquema simplificado de um tubo emissor de raios X. O filamento, ao ser aquecido, emite elétrons que são acelerados pela diferença de potencial (V) entre os eletrodos (anodo e o catodo). Quando os elétrons atingem o alvo, que geralmente é produzido de metal de alto ponto de fusão, como o tungstênio ou molibdênio, produzem raios X. (OKUNO, 2010)

1.4. PRODUÇÃO DE RAIOS X: RAIOS X DE FREAMENTO E CARACTERÍSTICOS

Os raios X de freamento são produzidos quando uma pequena fração dos elétrons incidentes no alvo aproxima-se dos núcleos dos átomos, que constituem o alvo. Segundo Okuno (2010), os elétrons podem perder, de uma só vez, uma fração considerável de sua energia, emitindo um fóton de raio X. Essa desaceleração brusca pode ocorrer devido a atração causada pelo campo coulombiano do núcleo. Assim, o espectro de raios X de freamento é contínuo, ou seja, os fótons de raio X produzidos podem ter qualquer energia, desde valores próximos de zero até um valor máximo de $E_{\text{máx}}$, estimado a partir da equação (1). O valor de $E_{\text{máx}}$ representa toda a energia cinética (K) do elétron ao atingir o alvo.

$$K_{\text{(elétron)}} = eV = E_{\text{máx do fóton}} = h\nu_{\text{Max}} = hc/\lambda_{\text{min}} \quad (1)$$

O termo e corresponde a carga do elétron; V é a diferença de potencial aplicada entre o catodo e o anodo, ν e λ são, respectivamente, a frequência e o comprimento de onda radiação X. Essa equação é conhecida como lei de Duane e Hunt.

Além dos raios X de freamento, existem também os chamados raios X característicos que podem ser produzidos simultaneamente aos raios X de freamento em um tubo de raios X. Diferentemente dos raios X de freamento, que independem do material de que é feito o alvo e podem ter qualquer energia com limite no valor máximo, os raios X característicos apresentam uma assinatura do material do alvo e têm espectro de energia discreto (OKUNO, 2010). Segundo a autora, a produção de raios X característicos se dá da seguinte maneira:

Um fóton de energia na faixa de raio X é emitido quando as transições do elétron envolvem camadas mais internas do átomo. No primeiro caso, da emissão de um **fóton de luz**, a energia envolvida é da ordem de poucos eV, e no segundo, da emissão de um fóton de raio X, quando um elétron incidente no alvo remove um elétron da camada K, cria-se um buraco em seu lugar, que é imediatamente preenchido pela transição de um elétron da camada externa, por exemplo, da camada L, o qual, por sua vez, será preenchido por um elétron da camada M, e assim por diante (OKUNO, 2010, p.38).

Para remover um elétron da camada K de um átomo, o elétron incidente deve ter, no mínimo a energia de ligação nessa camada. Na transição de um elétron da camada L para a K, por exemplo, o excedente de energia é liberado na forma de um fóton, cuja energia $E_{\text{fóton (raio X)}}$

corresponde à diferença entre E_L e E_K , que representam as energias totais dos elétrons em suas respectivas camadas, conforme expresso na equação (2).

$$E_{\text{fóton (raio X)}} = E_L - E_K \quad (2)$$

Não é somente nos tubos de raios X que a radiação característica pode ser produzida. Existe uma técnica chamada PIXE (*Particle Induced X Ray Emission*), que é uma técnica utilizada para caracterizar os elementos químicos de uma determinada amostra. Na PIXE, os átomos podem ser excitados por feixes de partículas carregadas pesadas, ou mesmo de fótons, e decaem com a emissão de fótons que compõem essas raias características. Nessas situações, no entanto, não há produção de raios X de freamento, e observa-se apenas o espectro característico dos átomos. De acordo com Santos et al., (2010) a técnica do PIXE possui uma capacidade de diferenciação de elementos químicos muito elevada, já que geralmente todos os elementos com número atômico superior a 11 podem ser detectados simultaneamente em uma única medição e sem nenhum conhecimento prévio dos elementos presentes na amostra.

Na próxima seção, apresentaremos os aspectos históricos e as pesquisas que precederam no trabalho de Becquerel e suas contribuições para o campo da radioatividade.

1.5. BECQUEREL E A “DESCOBERTA” DA RADIOATIVIDADE

Os anos seguintes a detecção de Röntgen contribuíram substancialmente para que a revolução científica iniciada no final do século XIX tivesse sequência. Henri Poincaré foi um dos cientistas que recebeu diretamente de Röntgen os resultados de seus experimentos e ficou profundamente interessado por eles (MARTINS, 2012). Ainda que já tenhamos apresentado as propriedades físicas dos raios X, nesse momento da história elas ainda eram desconhecidas pelos cientistas. De acordo com Martins (2004)

As principais hipóteses aventadas sobre a natureza desses raios eram: (a) poderiam ser ondas eletromagnéticas transversais de pequeno comprimento de onda, semelhantes a radiação ultravioleta; (b) poderiam ser ondas eletromagnéticas longitudinais (hipótese proposta pelo próprio Röntgen); (c) poderiam ser pulsos periódicos de radiação eletromagnética (hipótese proposta por Stokes); (d) poderiam, enfim, ser de natureza corpuscular formados por raios catódicos modificados (neutros). (p. 504)

Ou seja, os cientistas, até aquele momento, conheciam o que observavam ao reproduzir o experimento de Röntgen, ou seja, que uma corrente elétrica ao atravessar um tubo de Crookes produzia na parede do tubo uma luminescência, exatamente na mesma região em que os raios X eram emitidos. Poincaré então levantou a hipótese que poderia então existir uma relação entre a emissão dos raios X e fluorescência observada no vidro (MARTINS, 2004). Essa hipótese passou a ser conhecida como “conjectura de Poincaré” e foi testada por diversos cientistas. Muito embora, segundo Martins (2004), essa conjectura estivesse errada do ponto de vista físico, uma vez que não existe relação direta entre a produção dos raios X e a luminescência detectada no vidro, essa conjectura possibilitou a investigação de outro fenômeno diretamente relacionado com a física das radiações: a radioatividade de certos elementos químicos (no caso, o urânio) por Henri Antoine Becquerel.

Henri Becquerel vinha de uma família de cientistas que possuíam grande interesse pelo estudo da fosforescência. Seu avô Antoine César Becquerel foi professor e diretor do *Musée d'Historie Naturelle* de Paris, no qual fez diversas pesquisas sobre fosforescência. Edmond Becquerel, filho de Antoine, praticamente seguiu os mesmos passos do pai, lecionando no Musée. Enquanto pesquisador estudou a ação química da luz, além de trabalhos relacionados à fluorescência do urânio.

Conforme aponta Martins (2012), Henri Becquerel iniciou suas pesquisas no campo dos fenômenos ópticos, especialmente a fosforescência, dando continuidade aos interesses dos antepassados. A maioria das substâncias utilizadas por Becquerel eram compostos a base de urânio, considerados interessantes para pesquisas sobre luminescência por duas razões: havia muitas substâncias fosforescentes distintas que tinham urânio como seu elemento constituinte; e sua fluorescência era extraordinariamente forte. Ainda, segundo Martins (2012), o pai de Henri Becquerel havia estudado o nitrato, o cloreto, o fluoreto duplo de urânio e potássio, fosfato e o sulfato duplo de potássio, sendo esse último o composto utilizado nos estudos que culminariam no fenômeno da radioatividade. Com relação a essa constatação, Martins (2012) aponta que:

Na reunião da Academia de Ciências da semana seguinte (2 de março de 1896), Arsène d'Arsonval comunicou que havia sido capaz de produzir radiografias utilizando uma lâmpada fluorescente e colocando um vidro fluorescente sobre os objetos a serem radiografados. Esse vidro fluorescente continha um sal de urânio. A conclusão de d'Arsonval foi que todos os corpos que emitem luz fluorescente amarelo-esverdeada também emitem radiações que são capazes de impressionar chapas fotográficas envoltas em papel opaco à luz. (p. 107-108)

Naquele mesmo dia, o autor supracitado cita que Becquerel apresentou aos membros da Academia de Ciências um segundo trabalho – descrito por diversos autores como sendo o trabalho referente à compreensão do fenômeno da radioatividade. Segundo Becquerel, seu experimento tinha como finalidade observar os efeitos que a radiação solar teria sobre determinadas substâncias fosforescentes (nesse caso, um sulfato duplo de urânio e potássio) colocados junto às chapas fotográficas. Entretanto, nos dias que se passaram (26 e 27 de fevereiro de 1896) o Sol aparecia de maneira muito discreta, com o tempo estando praticamente nublado, fazendo com que Becquerel guardasse seu sulfato duplo junto com chapas fotográficas e seus envoltórios, dentro de uma gaveta. No dia 1 de março, cansado de esperar pela melhora do tempo, Becquerel resolveu revelar as chapas fotográficas, na esperança de encontrar imagens muito fracas. Tamanha foi a surpresa de Becquerel quando, ao revelar as chapas, percebeu que elas estavam perfeitamente nítidas. De acordo com Segrè (1987), Becquerel percebeu, naquele momento, que o sal de urânio emitia raios capazes de transpor o papel negro, mesmo que não estivesse sido exposto à luz solar.

1.6. MARIE E PIERRE CURIE: “DETECÇÃO” DE NOVOS ELEMENTOS RADIOATIVOS

Conforme apresenta Martins (2012), uma semana após a comunicação de Becquerel, Louis Troost confirmou os experimentos de Charles Henry com sulfeto de zinco, no qual relatou ter obtido fortes efeitos radiográficos a partir da fosforescência de uma placa excitada por luz de magnésio. Dessa maneira, a Academia de Ciências ratificou a conjectura proposta por Poincaré, possibilitando que anos depois que Becquerel, no ano de 1903 fosse laureado com o prêmio Nobel de física.

Entretanto, outros cientistas começaram a se debruçar sobre os experimentos de Becquerel com sais de urânio. Não que Becquerel tivesse abdicado de seus estudos, tal como fizera Röntgen com seus misteriosos raios X. Porém, conforme aponta Segrè (1987) “Mas restringiu-se ao urânio como fonte de seus raios, pois o urânio era a substância que ele melhor conhecia” (p. 30). O próximo grande passo seria dado pelo casal Pierre e Marie Curie, especialmente as contribuições de Marie.

Marie Sklodowska nasceu na Polônia, na cidade de Varsóvia, no dia 7 de novembro de 1867, era a terceira de quatro irmãos e perdeu cedo sua mãe, sendo criada e educada por seu pai, o qual era professor de matemática e física. Após a conclusão do secundário Marie e a irmã Bronya seguiram para Paris para prosseguirem seus estudos, onde teve a oportunidade de se

relacionar com grandes cientistas da época, mesmo passando por situações financeiras bastante complicadas. Nas palavras de Segrè;

Em Paris, Marie matriculou-se na Faculdade de Ciências e frequentou cursos de física, química e matemática com os professores Lippmann, Bouty e Appel, este o autor do famoso tratado *Mécanique Rationnelle* (sobre mecânica teórica). [...] Ela estudava e trabalhava com fanatismo, quase sem dinheiro e com muita pouca coisa para comer. (1987, p.33)

Conheceu, durante esse período, Pierre Curie, com o qual veio a se casar no ano de 1894. Nos primeiros anos do casamento de Pierre e Marie, a ciência começou a se modificar drasticamente. Röntgen havia descoberto os raios X, enquanto Becquerel explorava a natureza (ainda misteriosa) das radiações emitidas pelos compostos à base de urânio. Conforme aponta Strathern (2000), Marie acompanhava as investigações de Röntgen e Becquerel com demasiado interesse, discutindo-as permanentemente com Pierre. Como estava à procura de um tema para seu doutorado, resolveu que se tratava de um assunto interessante e buscou compreender os fenômenos por trás dessa nova radiação dos compostos de urânio.

Em dezembro de 1897, Marie iniciou seus trabalhos sobre a radiação emitida por sulfato de potássio uranilo, com a realização de uma réplica do experimento de Becquerel. Um ano depois, Gabriel Lippmann apresentou para a Academia de Ciências um trabalho de Marie Curie.

Nesse trabalho, Marie havia inspecionado um número significativo de compostos de urânio e definiu que todos eles emitiam radiações ionizantes, a qual era proporcional a quantidade de urânio presente na amostra (MARTINS, 2012). Além disso, Marie apresentou que outras substâncias, como o tório, também emitiam radiações ionizantes. Posteriormente Marie detectou dois novos elementos químicos que apresentavam radioatividade (termo cunhado por Marie para designar elementos químicos que emitiam radiação ionizante de maneira espontânea), tal como o tório e o urânio: o rádio e o polônio, esse último teve o nome dado em homenagem a terra natal de Marie, a Polônia.

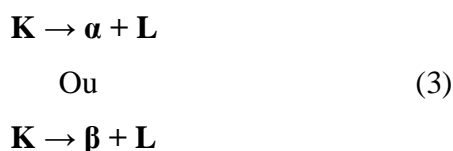
Em decorrência de suas contribuições Marie foi agraciada com dois prêmios Nobel. O primeiro, em 1903, em conjunto com Pierre Curie e com Henri Becquerel; posteriormente, no ano de 1911 voltaria a receber o Nobel, dessa vez em química, tornando-se a primeira e única pessoa a ser laureada com dois prêmios Nobel em duas áreas científicas distintas. Nesse sentido, a radioatividade conduziu a ciência para uma nova era de desenvolvimento de novas tecnologias, ao passo que também contribuiu para que despertasse certo receio na humanidade, tal como o risco de guerras atômicas.

1.7. O CONCEITO DE ELEMENTO QUÍMICO, ISÓTOPO, NUCLÍDEO E RADIONUCLÍDEO

Um elemento químico é uma substância que não pode ser decomposta em algo mais simples por uma reação química. De maneira mais genérica, um elemento pode ser entendido como um conjunto de átomos caracterizado pelo número de prótons no núcleo, chamado de *número atômico* (Z). Em química um elemento dito *puro* é aquele constituído exclusivamente pelos mesmos tipos de átomos.

Já um *nuclídeo* é um átomo caracterizado por um número atômico e um *número de massa* (A), que é o número de prótons mais o número de nêutrons no núcleo. Os nuclídeos são representados da seguinte maneira: A_ZX sendo A o número de massa e Z o número de prótons que por sua vez é igual ao número de elétrons de um átomo neutro e X , o símbolo do elemento químico. A diferença $A - Z$ dá número de nêutrons de um núcleo.

Por sua vez, os *isótopos* são nuclídeos com igual número de prótons, porém com número diferente de nêutrons. Por exemplo, o hidrogênio tem três isótopos: o ${}^1\text{H}$, com um próton no núcleo, é o mais abundante na natureza (99,985%). O ${}^2\text{H}$, chamado de deutério, tem um próton e um nêutron no núcleo, e o ${}^3\text{H}$, denominado trítio ou trício, constituído por um próton e dois nêutrons. O trítio é radioativo, ou seja, seu núcleo é instável e atinge a estabilidade emitindo uma partícula β^- no processo de desintegração nuclear. Portanto, o trítio é considerado um radioisótopo, isto é, um nuclídeo instável que emite radiação. Sua *meia-vida* é de 12,26 anos. A meia-vida é o tempo em que metade dos átomos de uma fonte radioativa leva para desintegrar-se. A **desintegração** não está relacionada com a extinção do átomo, ou seja, o átomo não deixa de existir. Na prática, o que acontece é o decaimento natural do átomo. No decaimento, o átomo (K), ao emitir radiação alfa e beta, torna-se um novo elemento químico (L), o que ocorre ininterruptamente até que o átomo deixe de ser radioativo e passe a ser um átomo estável.



Se o átomo L formado após o decaimento ainda for instável, novos decaimentos ocorrerão até que a amostra se torne estável.

Os isótopos não podem ser separados quimicamente, uma vez que tem a mesma estrutura eletrônica e, por isso, sofrem as mesmas reações químicas. Por esse motivo, o urânio natural, para ser usado em um reator ou utilizado na fabricação de uma bomba atômica, deve ser enriquecido, isto é, ter a sua concentração de isótopos ^{235}U aumentada, uma vez que esse isótopo é físsil, ou seja, que seu núcleo possui capacidade de se romper em outros dois, liberando nêutrons (normalmente dois ou três) e energia quando captura um nêutron lento. Nesse processo, uma vasta dose de energia é liberada na condição de radiação devido à diferença de massa entre o núcleo original e o somatório das massas dos núcleos resultantes do decaimento radioativo.

1.8. DESINTEGRAÇÃO NUCLEAR

Diz-se que a *desintegração nuclear* ou o *decaimento radioativo* é o fenômeno físico em que há a *emissão espontânea* de partícula ou energia do interior de um núcleo atômico por meio da emissão de radiação a partir da instabilidade do núcleo. Existem os núcleos estáveis e instáveis. Os primeiros não decaem, ao contrário dos segundos que são radioativos. Um princípio importante envolvido na instabilidade do núcleo é o da conservação da energia. Nesse caso, leva-se em conta que a massa é equivalente à energia e que umas delas pode transformar-se em outra. Aplicando-se essa ideia à emissão de partículas alfa pelo núcleo do ^{242}Pu , podemos escrever o decaimento alfa como:



De acordo com Okuno (2010), o ^{242}Pu transmuta-se em ^{238}U e ocorre a emissão de uma partícula alfa. Dizemos também que o ^{242}Pu decai em ^{238}U , emitindo uma partícula alfa. Para esse decaimento ocorrer, a massa nuclear do Pu-242 deve exceder a soma das massas do núcleo do ^{238}U e da partícula alfa, isto é:

$$M_{\text{nuc}}(^{242}\text{Pu}) > M_{\text{nuc}}(^{238}\text{U}) + M_{\text{nuc}}(^4\alpha) \quad (5)$$

O excesso de energia se manifesta como energia cinética, principalmente da partícula alfa e, eventualmente, como energia de excitação do núcleo produzido a partir do decaimento. Em síntese, para que ocorra decaimento, a massa total antes deve ser maior do que a soma das massas após o decaimento. Um dado interessante é que todos os núcleos com número de massa

$A > 140$ satisfazem a equação anterior, entretanto existem muitos núcleos estáveis nessas condições. Isso acontece porque a condição dada anteriormente é necessária, mas não suficiente para ocorrer decaimento (OKUNO, 2010).

1.9. IRÈNE CURIE E FREDERIC JOLIOT: O FENÔMENO DA RADIOATIVIDADE ARTIFICIAL

Irene Curie, nascida em Paris, em 12 de setembro de 1897, era filha de Pierre e Marie Curie. Após iniciar seus estudos na Faculdade de Ciências de Paris, Irène serviu como voluntária durante a Primeira Guerra Mundial, auxiliando sua mãe na operacionalização de aparelhos de raios X e soldados franceses feridos em campos de batalha. Gilmer (2011) destaca que, no mesmo ano em que a primeira guerra eclodiu, Irène iniciou seus estudos na Universidade de Sorbonne, porém seus estudos foram interrompidos devido ao clima bélico na Europa. Ainda, segundo Gilmer (2011):

No mesmo ano, quando Irène estava apenas com 17 anos, ela começou a ajudar sua mãe a ensinar cirurgiões e médicos no campo de batalha como usar raios-X para encontrar balas e estilhaços nos soldados feridos, para ajudar em suas extrações. Com tanta necessidade desse tipo de serviço para os soldados franceses feridos, Marie Curie organizou 20 carros radiológicos, equipados com equipamento de raios-X. Irène e sua mãe treinaram outras mulheres para irem aos campos de batalha para ajudar os cirurgiões no local. [...] Irène refletiu mais tarde sobre a experiência: “Minha mãe não teve mais dúvidas sobre mim do que duvidou de si mesma” [...]. Durante esse período, Irène e Marie formaram uma verdadeira colaboração, muito parecida com a que Marie experimentou com seu marido Pierre. Sobre essa colaboração, Irène disse reflexivamente, anos depois: “[Eu sou] mais parecido com meu pai e, talvez, essa seja uma das razões pelas quais nos entendemos tão bem”. (p. 43)

Ao final da guerra, Irène trabalhou com a mãe no Instituto Radium, criado por Marie antes da grande guerra. Guilmer (2011) destaca que a composição do laboratório em que Marie trabalhara mudou ao longo dos anos pós-guerra, uma vez que a maioria das trabalhadoras eram mulheres, já que a maioria dos homens haviam morrido na guerra. Após uma viagem com a mãe e a irmã Eve, para os Estados Unidos, Irène regressa a Paris para continuar sua pesquisa de doutorado no Instituto Radium. Ela se tornou doutora em ciências em 1925, tendo preparado uma tese sobre os raios alfa do polônio. No ano seguinte, Irène casou-se com o também cientista, Frederic Joliot.

Nomeada professora em 1932, tornou-se professora na Faculdade de Ciências de Paris em 1937. Em 1936, Irène Joliot-Curie foi nomeada subsecretária de Estado para

pesquisa científica. Ela era membro de várias academias estrangeiras e de inúmeras sociedades científicas, possuía doutorado honorário em várias universidades e era oficial da Legião de Honra. Em 1946, tornou-se diretora do Instituto Radium em 1946.

Jean Frédéric Joliot, nascido em Paris, em 19 de março de 1900, formou-se na *École de Physique et Chimie* da cidade de Paris. Em 1925, tornou-se assistente de Marie Curie no *Institut Radium*. Já em 1930 ele obteve o título de Doutor em Ciências, com tese que versa sobre eletroquímica de elementos radioelétricos, e tornou-se professor de Faculdade de Ciências de Paris em 1935. Em 1937, foi nomeado professor no Collège de France (NOBELPRIZE.ORG, 1935).

Assim como Marie e Pierre, Irène e Frederic passaram suas vidas dedicando-se as pesquisas científicas. Em especial, eles estudaram as particularidades dos núcleos dos átomos, considerado um passo essencial na detecção do nêutron por James Chadwick em 1932 e do pósitron, por Carl David Anderson, também no mesmo ano, ficando muito próximos de serem laureados com o prêmio Nobel. Entretanto, o melhor ainda estava por vir em 1935 com o reconhecimento de todo trabalho por meio do prêmio Nobel, curiosamente na área na qual a mãe de Irène havia se consagrado anos antes: a radioatividade. Nesse caso, Irène e Frederic realizaram importantes estudos sobre radioatividade natural e artificial, transmutação de elementos e física nuclear (1934). Ela compartilhou com ele o Prêmio Nobel de Química de 1935, em reconhecimento à síntese de novos elementos radioativos. Por bombardeio de boro, alumínio e magnésio com partículas alfa, eles produziram o isótopo 13 do nitrogênio, o isótopo 30 do fósforo e, simultaneamente, os isótopos 27 do silício e 28 do alumínio. Esses elementos, não encontrados naturalmente, se decompõem espontaneamente, com um período mais ou menos longo, por emissão de elétrons positivos ou negativos (NOBELPRIZE.ORG, 1935).

Finalizada a exposição acerca das contribuições de Irène e Frederic que culminaram na compreensão da radioatividade artificial, abordarei na próxima seção as questões conceituais relacionadas ao processo de transmutação (tanto natural quanto artificial) dos elementos radioativos que são as leis do decaimento radioativo e da atividade de uma amostra radioativa.

1.10. LEI FUNDAMENTAL DO DECAIMENTO RADIOATIVO

Segundo Okuno (2010), Ernest Rutherford e Frederick Soddy escreveram em 1902 um importante artigo, *The cause and nature of radioactivity*, no qual apresentaram a lei fundamental do decaimento radioativo, expressa na equação:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Na qual N_0 é o número de átomos inicialmente presentes (no instante $t = 0$); $N(t)$, o número de átomos que ainda não se desintegram após um intervalo de tempo t , e , é a base dos logaritmos naturais e λ , a constante de decaimento, que é característica de cada radionuclídeo.

Okuno (ibidem) relata que no ano de 1905 a lei do decaimento radioativo foi deduzida por Ergon von Schweidller, o qual, a partir de ponderações estatísticas, constatou que se o número de radionuclídeos independentes no tempo t for N , ao tomarmos que cada partícula tem a mesma constante de probabilidade λ de decair por unidade de tempo, independentemente da sua idade, então o número dN decaindo no tempo dt é:

$$dN = -\lambda N(t)dt \quad (7)$$

O sinal negativo indica que N decresce com o aumento de t . Reescrevendo a equação (7), temos:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (8)$$

Ao integrarmos a equação (8):

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (9)$$

Obtemos então:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \quad (10)$$

Ou ainda, $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ que é a mesma equação (equação (6)) obtida por Rutherford e Soddy. Uma vez que a meia-vida física $T_{1/2}$ é o tempo necessário para metade de uma amostra de átomos de um radionuclídeo decair para outra forma nuclear, podemos encontrar uma relação entre $T_{1/2}$ e λ :

$$t = T_{1/2} \rightarrow N = \frac{N_0}{2} \quad (11)$$

Substituindo esses valores na equação (6), temos:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) \quad (12)$$

Que resulta em:

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2}, \quad \text{de onde} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad (13)$$

Assim, a equação (6) pode ser escrita como:

$$N = \frac{N_0}{e^{\lambda t}} = \frac{N_0}{e^{\frac{0,693 t}{T_{1/2}}}} = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}} \quad (14)$$

1.11. ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA RADIOATIVA

Para finalizarmos esse capítulo teórico-conceitual, descrevemos a taxa de decaimento (também denominada por **atividade**) de uma amostra radioativa que é o número de transformações nucleares por unidade de tempo que ocorrem na amostra. Essas transformações

podem envolver a emissão de partículas carregadas, captura de elétrons ou transição isomérica e pode ser estimada pela equação:

$$A = \lambda N = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (15)$$

Em que $A_0 = N_0 \lambda$ e $A = N \lambda$ são as atividades da amostra no instante inicial e no instante t , respectivamente. É importante observar que tanto o número de átomos de uma amostra radioativa quanto a atividade diminuem exponencialmente com o tempo:

$$A = \frac{A_0}{e^{\lambda t}} = \frac{A_0}{e^{\frac{0,693 t}{T_{1/2}}}} = \frac{A_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}} \quad (16)$$

A unidade de atividade no Sistema Internacional (SI) é o becquerel (Bq), o qual corresponde a uma desintegração por segundo.

Cabe destacar que nosso foco foi direcionado à Física dos Raios X, a interação da radiação com a matéria e aos processos de fissão e fusão nuclear. Entendo que são conceitos relevantes e que necessitam de uma atenção para a formação inicial do futuro professor de Física. Embora sendo um conteúdo presente nos documentos educacionais, como na BNCC e no Currículo Paulista, o ensino da FRI e do fenômeno da Radioatividade, em geral, é deixado em segundo plano, em comparação com outros tópicos curriculares, durante a graduação.

Por fim, argumentamos sobre a necessidade da inserção da FRI nos currículos dos cursos de formação de professores, tendo em vista a ausência deste tópico como mostraremos mais adiante, com o intuito de assegurarmos um ensino de física com qualidade, visando evitar a perpetuação de conceitos equivocados, tanto por parte de professores, quanto por parte dos alunos.

Após descrever a base teórico-conceitual da FRI, apresento, no próximo capítulo, um levantamento bibliográfico das produções acadêmicas realizado até o ano de 2020 que versa sobre o ensino da FRI e realizo um estudo comparativo quanto aos tópicos relacionados à temática em questão nas coleções didáticas de física do triênio 2018-2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho, buscamos comentar os frutos desta pesquisa, tomando-os como elementos que permitam responder às questões propostas nessa pesquisa. Dessa forma, iniciamos fazendo uma análise geral de todas as aulas trabalhadas durante o curso em consonância com as análises realizadas nos capítulos anteriores.

O primeiro aspecto que destacamos diz respeito a proposta da disciplina. Após realizarmos o levantamento dos cursos de física, constatamos que existe uma lacuna relativa à temática da FRI nos cursos de formação inicial da UNESP. A partir dessa constatação, buscamos elaborar uma disciplina que contemplasse esse conteúdo, já que entendemos que se trata de fenômenos pertinentes que devem constar na formação inicial dos licenciandos em física, visto que no Currículo Paulista a FRI e a radioatividade são parte do conteúdo a ser trabalhado na educação básica. Ademais a aplicação da disciplina se deu em um caráter excepcional em decorrência da pandemia global de Covid-19, o que fez com que tivéssemos que readequar uma disciplina que seria ministrada em formato presencial e teve que ser repensada para ser trabalhada de maneira remota. Por exemplo, na aula cinco, havia a intenção de replicar um dispositivo experimental de baixo custo identificado no artigo científico indicado na bibliografia que permitiria mapear a concentração dos filhos do Radônio-222 no ar. Essa atividade teve que ser abandonada pois havia restrições, tanto dos comércios, quanto da circulação de pessoas, o que inviabilizaria a obtenção dos materiais.

Aqui também vale destacar que alguns assuntos ficaram de fora de nossa disciplina como, por exemplo, a radiação de fundo. Na primeira aula, foi entregue aos participantes um questionário no qual constava uma pergunta sobre qual assunto eles gostariam de estudar. Dentre as alternativas havia a radiação de fundo que foi uma das mais votadas (cinco votos, empatada com aplicação na indústria). Na construção do curso havia o desejo de inserir esse assunto, porém, na medida em que a disciplina foi se desenhando, entendemos que o assunto

ficaria “solto” dentro da proposta e, por essa razão, acabamos excluindo-o e não nos atentamos ao fato de que ele estava presente como uma das opções no questionário da primeira aula.

Isso nos leva ao nosso segundo ponto: a participação dos estudantes e o os sentidos produzidos. Em relação a participação dos estudantes podemos destacar que foi satisfatória. Isso porque a turma constava com um total de vinte alunos matriculados na disciplina e uma média de dezessete questionários devolvidos após cada atividade solicitada. No que diz respeito a participação de fato nas aulas, os estudantes iniciaram de maneira mais tímida e, aos poucos, começaram a ter maior participação, seja nas aulas, seja nas atividades de debate ou gameficação.

Já em relação aos sentidos produzidos pudemos verificar um avanço significativo. Tal constatação se deve ao fato de termos acompanhado os discursos elaborados nas primeiras aulas e compararmos com aqueles produzidos ao final do curso. Identificamos ideias mais estruturadas, conceitualmente adequadas e mais autênticas, sem se prender a respostas obtidas de sites de pesquisa da internet. De acordo com Orlandi (2008);

Todo texto é heterogêneo (E. Orlandi, 1987) do ponto de vista de sua constituição discursiva: ele é atravessado por diferentes formações discursivas, ele é afetado por diferentes posições do sujeito, em sua relação desigual e contraditória com os sentidos, com o político, com a ideologia. [...] Embora o interdiscurso não seja representável, seus efeitos estão representados na articulação de diferentes formações discursivas que recortam o texto de maneira desigual. (p.115)

O fato de que os estudantes conseguiram produzir respostas mais satisfatórias (discursos mais robustos e conceitualmente corretos) passa pelo contato com outras fontes de informação que possibilitaram a eles uma compreensão mais pertinente da temática. A leitura prévia dos textos científicos no momento anterior a aula, a série televisiva, a atividade investigativa e o uso de notícias que envolviam as radiações ionizantes concebeu aos estudantes uma gama de possibilidades para que pudessem ir construindo seus próprios argumentos e estruturando melhor suas respostas, bem como auxiliou na elaboração do plano de aula.

No que se refere aos planos de aula, foi interessante notar que diversas metodologias implementadas no decorrer das aulas foram replicadas pelos estudantes, tais como: o uso de questionários para o levantamento de concepções prévias, o emprego de vídeos e atividades de gameficação, o uso de notícias científicas, utilização da abordagem histórica para o ensino das radiações e a diferenciação entre risco e perigo. Isso ajuda a corroborar a importância das disciplinas de caráter pedagógico na elaboração da disciplina, já que elas foram retomadas na

avaliação final, mostrando que os sentidos atribuídos pelos estudantes não se limitaram exclusivamente aos aspectos conceituais, mas também nas questões metodológicas do nosso curso.

Já o terceiro enfoque que gostaríamos de ressaltar em nossas considerações diz respeito a possibilidade de replicação e a viabilidade de adequação de nossa disciplina para cada unidade da UNESP onde há um curso de licenciatura em física. A instituição, que neste ano completou 47 anos de existência, tem entre as 136 opções de cursos oferecidas, 66 cursos de formação em algum tipo de licenciatura distribuídos em 15 cidades. De acordo com o próprio site da instituição, os antigos Institutos Isolados serviram para formar professores com o objetivo de atender a expansão das escolas primárias e secundárias pelo interior do estado de São Paulo. Desse modo, entendemos que seja razoável sugerir aos departamentos de física e/ou a reitoria da instituição a possibilidade de inserção da disciplina de física das radiações ionizantes em seus currículos, ainda que em caráter optativo. É comum nos depararmos com trabalhos que citam os problemas que permeiam a educação, tanto no nível básico, quanto no nível superior sem apresentar soluções práticas. Não temos a audácia de creditar a essa tese a solução dos problemas que perpassa o currículo do ensino superior dos cursos de física. Todavia, expusemos aqui um problema presente em todas as unidades que ofertam cursos de licenciatura em física: a ausência de uma disciplina que discuta conceitos atrelados as radiações ionizantes. Assim, acreditamos que esse trabalho sirva como um propulsor para que outras disciplinas sejam pensadas e/ou adaptadas a partir desse projeto piloto.

Em relação aos desdobramentos da disciplina para os futuros professores, podemos considerar que a expectativa é a mais positiva possível. O feedback dado pelos participantes da disciplina foi muito positivo, sob a ótica das questões conceituais. A disciplina foi muito elogiada por contribuir para a desmistificação das radiações e apresentar aplicações benéficas para a sociedade; bem como por expor a diferença entre termos como contaminação e irradiação, além de apontar a relação da física com a sociedade, permitindo uma compreensão mais adequada de como as radiações estão presentes em nossas atividades rotineiras. Já do ponto de vista pedagógico, as maiores “críticas” vieram da quantidade de textos que foram trabalhados durante o curso e que foram classificadas como excessivas; da falta de exercícios matemáticos; da ausência de uma discussão mais aprofundada quanto a questão do risco e, finalmente de uma quantidade maior de atividades pautadas na gamificação. Entretanto, a sequência dos conteúdos e a metodologia foram elogiadas pelos participantes, bem como em alguns casos, até mesmo reproduzida nos planos de aula, o que reforça nosso entendimento e da nossa defesa em favor do emprego de diversificadas metodologias.

Cabe destacar ainda a relação dos currículos com a FRI. No que diz respeito aos conteúdos relacionados a FRI e as radiações, constatamos, a partir das análises das coleções didáticas, que esses conteúdos ainda não apresentam uma sequência linear bem consolidada como outros conteúdos de física (tais como mecânica, óptica, termodinâmica e eletromagnetismo), do ponto de vista da construção do currículo da educação básica. Dessa maneira, entendo que isso possa ser prejudicial ao aluno, estabelecendo dificuldades ao ensino organizado a partir de uma sequência bem estruturada desses conteúdos, bem como sob a perspectiva relacionada a discussões sócio científicas.

Quanto ao Ensino Superior, Mendes, Nossa e Londero (2019) e Bertoni e Londero (2021,2023) mostram que a FRI, no contexto dos currículos da Unesp, parece não se tratar de fenômenos propensos a serem explorados em uma disciplina exclusiva na formação dos futuros professores de Física. Somente duas disciplinas mapeadas se prestam exclusivamente ao ensino das Radiações Ionizantes, sendo que ambas são oferecidas em caráter optativo (Física Moderna para Professores do Ensino Médio (UNESP – Guaratinguetá) e Física das Radiações Ionizantes (UNESP – São José do Rio Preto))

Assim, argumento a favor de uma ampliação de disciplinas relacionadas à discussão dos fenômenos da FRI e da radioatividade, com o intuito de assegurar ao ensino básico um profissional que esteja preparado para lidar com os desafios que envolvem o ensino das radiações ionizantes e da radioatividade.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. C.; VIANNA, D. M. Coleta Certa: Jogo de tabuleiro moderno sobre rejeitos radioativos. **Caminhos da educação matemática em revista (online)**, v. 12, n.1, p.304-318, 2022.

ALSOP, S. **Living with and learning about radioactivity: A comparative conceptual study**. International Journal of Science Education, p.263-281, 2001.

ALSOP, S; WATTS, M. Interviews about scenarios: Exploring the affective dimension of physics education. **Research in Education**, n.63, p. 21–33, 2000.

ANDERSON, D, L. **The Discovery of the Electron**. Princeton: D. Van Nostrand Company, Inc. (1964).

AQUINO, K, A, S; CHIARO, S. O uso de mapas conceituais: percepções sobre a construção de conhecimentos de estudantes do ensino médio a respeito do tema radioatividade. **Ciências & Cognição**, v. 18, n. 2, p. 158-171, 2013.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BARRAGÁN, P.; MORTIMER, E. F.; LEAL, A. **Avaliação preliminar sobre o conceito de radiação e algumas de suas tecnologias: ideias informais de estudantes do ensino médio**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7,2009. Santa Catarina. Florianópolis: ABRAPEC, 2009.

BASSO, L. D. P.; TERRAZZAN, E. A. Organização e realização do processo de escolha de livros didáticos em escolas de educação básica. **Revista Eletrônica de Educação**, v. 9, n. 3, p. 256-272, 2015.

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 a radioatividade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 880-902, dez. 2017.

BECK, U. **Critical theory of world risk society: a cosmopolitan vision**. Constellations 16 (1), 3–22, 2009.

BERTONI, E. D.; SILVA, L. L. As Radiações Ionizantes na Formação inicial de Professores: Análise dos Projetos Pedagógicos dos Cursos de Física de uma

Universidade Pública Brasileira. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 33, p. 229-234, 2021.

BERTONI, E. D.; SILVA, L. L. As Radiações Ionizantes na Formação inicial de Professores: Análise dos Projetos Pedagógicos dos Cursos de Física de uma Universidade Pública Brasileira. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 33, p. 229-234, 2021.

BERTONI, E. D.; SILVA, L. L. As Radiações Ionizantes nos Currículos de Física Licenciatura: uma análise a partir do Dispositivo Pedagógico de Basil Bernstein (no prelo)

BEZ, T, V; ALEXANDRE, W; COSTA, S. A radioatividade na visão dos alunos de um curso de licenciatura em ciências da natureza. **2º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul**. Araranguá (SC), 2013.

BOFF, C. A; BASTOS, R. O; MELQUIADES, F. L. Práticas experimentais no ensino de física nuclear utilizando material de baixo custo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v.34, n.1, 2017.

BOLZANI, V. da S. Mulheres na ciência: por que ainda somos tão poucas? **Ciência e Cultura**: São Paulo, v.69, n.4, p.56-59, 2017.

BOSCO, E; DI GIULIO, G, M. Ulrich Beck: considerações sobre sua contribuição para os estudos em Ambiente e Sociedade e desafios. **Ambiente & Sociedade**, v.18, n.2, 145-156, 2015.

BOSI, A, P. A precarização do trabalho docente nas instituições de ensino superior do Brasil nesses últimos 25 anos. **Educação e Sociedade**: Campinas, vol. 28, n. 101, p. 1503-1523, 2007.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. Interações discursivas e o uso de analogias no ensino de física. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.17, n.1, 2012.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. O uso de analogias no ensino de física em nível universitário: interpretações sobre os discursos do professor e dos alunos. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 6, n. 3, 2006.

BRAKE, M. Science fiction in the Classroom. **Physics Education**, v.38, n.1, 2003.

BRANDÃO, H. H. N. **Introdução à análise do discurso**. Campinas: editora Unicamp, 2004.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: Ministério da Educação, 2016. Disponível em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/documento/BNCC-APRESENTACAO.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2020.

_____. **Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de Física**. Brasília: Ministério da Educação, 2001, Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf>> Acesso em: 7 jun. 2020.

_____. **Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional**. Lei nº 9.394, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 dez. 1996.

BRITTO, D. M. C; MELLO, I. C. Fake News como estratégia para o ensino de ciências: avaliação de uma sequência didática. **Revista Vitruvian Cogitationes**, v. 3, n. 2, p. 32-52, 2022.

BRUGLIATO, E. T. **A produção de sentidos sobre a bomba atômica em diferentes tipos de discursos**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

BRUGLIATO, E. T. **Um estudo com licenciandos em física sobre a energia nuclear em livros didático e textos de divulgação científica**. Tese de Doutorado em Educação – Faculdade de Educação, Unicamp, Campinas, 2020.

CACHAPUZ, A.; PAIXÃO, F.; LOPES, J. B.; GUERRA, C. Do estado da arte da pesquisa em educação em ciências: linhas de pesquisa e o caso “ciência-tecnologia-sociedade”. **Alexandria**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 27-49, 2008.

CAMARGO, C. M. S. Memória discursiva e a Análise do Discurso na perspectiva pecheuxtiana e sua relação com a memória social. **Saber Humano**, v. 9, n. 14, p. 167-181, 2019.

CARVALHO, A. T.; MENEZES, A. L. T; DA SILVA, L. G; MENDONÇA, M.O.; DE CASTRO, J. N. P. Educação inovadora: jogos como alternativa para o ensino de radioatividade. In: IV Congresso Nacional de Pesquisa em Ciências, 2019, Campina Grande. Anais... Campina Grande (PB): Centro de Convenções Raymundo Asfora, em Campina Grande (PB).

CAVALCANTI, A. et al. **Metodologia do Ensino de Física I – Módulo de ensino inovador: a radiação na Medicina**. São Paulo: Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2016.

CHARAUDEAU., P. Uma problemática semiolinguística do estudo do discurso. In:_____.

- Linguagem e discurso:** modos de organização. São Paulo: Contexto, 2008.
- CHOPPIN, A. História dos livros e das edições didáticas: sobre o estado da arte. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 549-566, set./dez. 2004.
- CLEMENT, L.; TERRAZZAN, E.A. Resolução de problemas de lápis e papel numa abordagem investigativa. **Experiências em Ensino de Ciências**. v.7, n. 2, 2012.
- COLCLOUGH, N. D., LOCK, R.; SOARES, A. Pre-service teachers' subject knowledge of and attitudes about radioactivity and ionising radiation. **International Journal of Science Education**, 33(3), 423–446, 2011.
- COLOMBO JUNIOR, P. D.; LOURENÇO, A. B.; SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Ensino de física nos anos iniciais: análise da argumentação na resolução de uma “atividade de conhecimento físico”. **Investigações em Ensino de Ciências**. v.17, n 2, 2012
- CUNHA, M. B; GIORDAN, M. A Imagem da Ciência no Cinema. **Química nova na escola**, v.31, n. 1,2009.
- DARK, M. Using Science Fiction Movies in Introductory Physics. **The Physics Teacher**. v. 43, 2005.
- DRIVER, R. Students' conceptions and the learning of science. **International Journal of Science Education**, v.11, n.5, 1989.
- DUBCEK, L. Finding Facts in Science Fiction Films. **The Science Teacher**, 1993.
- DUBCEK, L. Science Fiction Aids Science Teaching. **The Physics Teacher**, 1990.
- DUBECK, L. Sci-Fi in the Classroom: Making a “Deep Impact” on Young People's Interest in Science. **Mercury**, 1998.
- DUTRA, P. M. B. F. **Percepção de estudantes do ensino médio sobre o tema “radiação” e tecnologias relacionadas:** ideias informais e categorias conceituais. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2010.
- EIJKELHOF, H. M. C. **Radiation and risk in physics education**. Utrecht: CD-p Press, 1990.
- EIJKELHOF, H.; MILLAR, R. **Reading about Chernobyl: the public understanding of radiation and radioactivity**. *School Science Review*, 35-41, 1988.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Editora Campus, 2006.

- EL-HANI, C. N. **Notas sobre o ensino de história e filosofia da ciência na educação científica de nível superior**. In: Silva, C.C. Estudos de História e Filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino (São Paulo, Livraria da Física, 2006).
- FAÊDA, K, C, M; MARTINS, M, I. Efeitos biológicos da radiação: Avaliação de uma proposta para a licenciatura em física. Simpósio Nacional de Ensino de Física, XX, 2013.
- FARIA, A. S. Z. A funcionalidade das perguntas na elaboração do conhecimento nas aulas de ciências. In: PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. O professor PDE e os desafios da escola pública paranaense, 2007. Disponível em http://www.gestaoescolar.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/producoes_pde/artigo_agnes_silvia_zeckel_faria.pdf.
- FAUGÉRES, L. **La dimension des faits et la théorie du risque. Le Risque et la crise**. European Coordination Centre for Research and Documentation in Social Sciences. Foundation for International Studies, Malta, p.31-60, 1990.
- FERRARI, P. Fake news, pós-verdade e o consumo de informações. In: XXVI ENCONTRO ANUAL DA COMPOS, 26., 2017, São Paulo. Anais...São Paulo: Faculdade Cásper Líbero; 2017.
- FOUREZ, G. **Alfabetización Científica y Tecnológica: acerca de las finalidades de la enseñanza de las ciencias**. Traducción: Elsa Gómez de Sarría. Buenos Aires: Ediciones Colihue, 1997.
- FRIEDMANN, A. **O brincar na Educação Infantil**. São Paulo: Moderna, 2012.
- GARCIA, N. M. D. Livro didático de Física e de Ciências: contribuições das pesquisas para a transformação do ensino. **Educar em Revista**, n. 44, p. 145-163, 2012.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GOMBRAGE, R. **A interpretação da física das radiações ionizantes por meio da leitura de textos**. Dissertação de Mestrado em Ensino e Processos Formativos, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2018.
- GOMES, V., B.; SOUSA, J. R.; BRITO, F. P. AlfaQuim: produção e avaliação de um jogo didático para o ensino de radioatividade. **Revista Eletrônica Ludus Scientiae**, v.5,n.1, p.1-18, 2021.

- GREGOLIN, M. R. F. V. Sentido, sujeito e memória: com o que sonha nossa vã autoria?. In: GREGOLIN, M. R. e BARONAS, R.. (Org.). **Análise do Discurso: as materialidades do sentido**. 01ed.São Carlos: Claraluz, 2001, v. 01, p. 60-80.
- GUTIÉRREZ, E. E., CAPUANO, V. C., PERROTTA, M. T., DE LA FUENTE, A. M., FOLLARI, B. R. ¿Qué piensan los jóvenes sobre radiactividad, estructura atómica y energía nuclear? **Enseñanza de las Ciencias**, v.18, n.2, p. 247-254, 2000.
- HILL, M. M. Desenho de questionário e análise dos dados - alguns contributos. In **Metodologia de Investigação em Ciências Sociais da Educação**. Edições Húmus.2014
- KAMIOJI, M. I. **O medo da energia nuclear-Energia nuclear, segurança e medo: o discurso do Jornal Folha de São Paulo na história das usinas nucleares (1979-2013)**. Tese de Doutorado em História Social das Ciências e das Técnicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- KAPLAN, I. **Física nuclear**. Espanha. Aguilar.1964.
- KELECOM, A; GOUVEA, R. A percepção da Radioatividade por Estudantes de Nível Superior. **Mundo & Vida, Rio de Janeiro**, v. 3, n.2, 2002.
- KIIPER, F, M. **Percepção Pública das Instalações Nucleares**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Reatores) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- KOONINGS, K.; KRUIJT, D. Introduction: Violence and Fear in Latin America. In: KOONINGS, Kees; KRUIJT, Dirk (Org.). **Societies of Fear: The Legacy of Civil War, Violence and Terror in Latin America**. New York: St. Martin's Press, 1999.
- KOPP, F. A.; ALMEIDA, V. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, 2019.
- KUSTER, A. C. **Avaliação de campos eletromagnéticos em regiões densamente povoadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LASTEC) Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, 2011.
- LACERDA, F. C. B.; DOS SANTOS, L. M. Integralidade na formação do ensino superior: metodologias ativas de aprendizagem. **Avaliação**, v. 23, n. 3, p. 611-627, 2018.

LEYTON, F. et al. Riscos da Radiação X e a Importância da Proteção Radiológica na Cardiologia Intervencionista: Uma Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Cardiologia Invasiva**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 87-98, Mar. 2014.

LIMA, N. W.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. Física Quântica no ensino médio: uma análise bakhtiniana de enunciados em livros didáticos de Física aprovados no PNLDEM 2015. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 435-459, 2017.

LONDERO, L. O modelo atômico de Bohr e as abordagens para seu ensino na escola média. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 9, n. 1, p. 13-37, 2014.

LONDERO, L.; SORPRESO, T, P; MOSINAHTI, G. Notícias científicas no Ensino de Física: um estudo na formação de professores. **Revista de Enseñanza de la Física**. Vol. 27, No. Extra, p. 229-237, 2015.

LONDERO, L.; SORPRESO, T. P. A natureza das ciências na formação de professores de física por meio do drama biográfico "Marie Curie, une femme sur le front". **Enseñanza de las ciencias**, n. extra, p. 3741-3746, 2017.

LONDERO, L.; TERRAZZAN, E. A. Familiaridade de alunos de ensino médio com situações análogas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, 2009.

LORENCINI JUNIOR, A. **O professor e as perguntas na construção do discurso em sala de aula**. Tese de doutorado em Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LUCENA, E, A; REIS, R, G; SORES, A, P, et al., Radiação ionizante, energia nuclear e proteção radiológica para a escola. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, DOI: 10.15392/bjrs.v5i1.215, 2017.

LUIZ, L, C; OLIVEIRA, L, F; BATISTA, R, T. O uso de ilustrações no ensino e no setor de radiologia como uma proposta para construção dos conceitos de física radiológica e radioproteção. **Revista Brasileira de Física Médica**. v.5, n.3, p.245-52, 2011.

MACHADO, V. F; SASSERON, L. H. As perguntas em aulas investigativas de Ciências: a construção teórica de categorias. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v.12, n.2, 2012.

MACIEL, F. G.; PASSOS, M. M.; ARRUDA, S. M. Pesquisas em Ensino de Ciências com Metodologia Interventiva: O que Fazem os Pesquisadores da Área? **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v.18, n.2, p. 549–579, 2018.

MAIA, B. R., DIAS, P. C. Ansiedade, depressão e estresse em estudantes universitários: o impacto da COVID-19. **Estudos de Psicologia**, v. 37, 2020.

MARCELLO NETTO, M. É possível representar o medo? um estudo de caso sobre o temor nuclear nas animações contemporâneas. In: ENCONTRO ESTADUAL DE HISTÓRIA ANPUH/RS, 12, 2014. Rio Grande do Sul. São Leopoldo: ANPUH, 2014.

MARÍN, J. El analfabetismo tecnológico. Monografias. com. Lucas Morea/Sinexi, SA. <http://www.monografias.com/trabajos12/elanolftc2.shtml> (2003).

MARTIN-DIAZ, M. J. Science Fiction comes into the Classroom: Maelstrom II. **The Physics Education**, v. 27, 1992.

MARTINS, R, A. **Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science**. New York: Routledge, 1994.

_____. Investigando o invisível: as pesquisas sobre raios X logo após a sua descoberta por Röntgen. **Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, n. 17, p. 81-102, 1997 (a).

_____. Becquerel and the choice of uranium compounds. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 51, p. 67-81, 1997 (b).

_____. A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, p. 373-91, 1998 (a).

_____. Jevons e o papel da analogia na arte da descoberta experimental: o caso da descoberta dos raios X e sua investigação pré-teórica. **Episteme. Filosofia e História das Ciências em Revista**, v. 3, n. 6, p. 222-49, 1998 (b).

_____. As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos. **Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2003.

_____. **Becquerel e a descoberta da radioatividade – uma análise crítica**. Campina Grande: EDUEPB/Livraria da Física, 2012.

MENDES, L. G.; NOSSA, I. M.; LONDERO, L. Análise da Inserção das Radiações Ionizantes no Currículo dos Cursos de Formação de Professores de Física do Estado de São Paulo/Brasil. **Revista de enseñanza de la física**, v. 31, p. 517-524, 2019.

MIRANDA, S. **Do fascínio do jogo à alegria do aprender**. Campinas, SP: Papiros, 2001.

MORAES, J. U. P. O Livro Didático de Física e o Ensino de Física: suas relações e origens. **Scientia Plena**, v.7, n. 094401, 2011.

MOURA, F. A; OLIVEIRA, P. V. O Ensino de Física Moderna baseado no filme Interestelar: Abordagem didática para a aprendizagem significativa. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 3, 2019.

NAUMAN, A. K. Sparking Science Interest through Literature: Sci-Fi Science. **Science Activities**, v. 31, n. 3, 1994.

NEUMANN, S.; HOPF, M. Children's Drawings about "Radiation" – Before and After Fukushima. **Research in Science Education**, v.43, p.1535-1549, 2012.

Nobelprize.org (1935). Frédéric Joliot and Irène Joliot-Curie. Nobel Prize in Chemistry. Retrieved from http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/joliot-curie-bio.html

NUNES, E. R.; ZYLBERSZTAJN, A. **Goiânia, Chernobyl e a Tecnologia Nuclear: A Informação Científica entre alunos do 2º grau**. In: A Ciência e a Integração Latino-Americana, Porto Alegre. 42ª Reunião Anual da SBPC - Anais. São Paulo: São Paulo Indústria Gráfica e Editora S/A, p. 104-105, 1990.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. **Estudos avançados**, 27 (77), 2013.

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

OKUNO, E; YOSHIMURA, E, M. **Física das Radiações**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

OLIVEIRA JUNIOR, E. M. **O Grande medo de 1987: uma releitura do acidente com o Césio-137 em Goiânia**. Tese de Doutorado em História – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ORLANDI, E. **Discurso e Leitura**. São Paulo: Cortez; Campinas: UNICAMP. 1988. 118p.

_____. **As formas do silêncio: no movimento dos sentidos**. Campinas: Editora da Unicamp. 1992.

_____. **Gestos de leitura**. Campinas: Editora Unicamp, 1994.

_____. Paráfrase e polissemia: a fluidez nos limites do simbólico. **Rua (Revista do Núcleo de Desenvolvimento da Criatividade)**. n.4. Campinas: Editora da Unicamp, 1998.

_____. **Análise de discurso: princípios e procedimentos**. 3.ed. Campinas: Pontes, 2001.

_____. **Interpretação: Autoria, leitura e efeitos do trabalho simbólico**. 4.ed. Campinas: Pontes, 2004.

_____. **Discurso e Texto Formulação e Circulação dos Sentidos**. Campinas: Pontes, 2008.

_____. **A linguagem e seu funcionamento: as formas do discurso**. 6ed. Campinas: Pontes, 2011, 276p.

ORLANDI, E; LAGAZZI-RODRIGUES, S. (org.). **Discurso e textualidade**. 2.ed. Campinas: Pontes, 2010, 214p.

PÊCHEUX, M. **Les vérités de la Palice**. Paris: Maspéro, 1975. Edição brasileira: Semântica e discurso: uma crítica à afirmação do óbvio. Tradução: ORLANDI, E. P. et. al. 2. ed. Campinas (SP): Editora da UNICAMP, 1995.

PÊCHEUX, M. Análise Automática do Discurso (AAD-69) IN GADET, F. HAK, T. (Org.). **Por Uma Análise Automática do Discurso: Uma Introdução à Obra de Michel Pêcheux**. 3ª Ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1997.

PEDUZZI L. O. Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 545 - 557, 2005.

PIASSI, L. P. C.; PIETROCOLA, M. Possibilidades dos filmes de ficção científica como recurso didático em aulas de física: a construção de um instrumento de análise. **Educação e pesquisa**, v.35, n.3, 2009.

PILAKOUTA, M, SAVIDOU, A, VASILEIADOU, S. **A laboratory activity for teaching natural radioactivity**. European Journal of Physics, n.1, v. 38, 2017.

PINHEIRO, R. M. LONDERO, L. “Marie Curie – a coragem do conhecimento”: uma possibilidade na discussão de aspectos da natureza da ciência. **Revista Valore**, v.6, p.1558-1569, 2021.

PIZZOLATO, N; ADORNO, D, P. **Informal physics teaching for a better society: a mooc-based and context-driven experience on learning radioactivity**. Journal of Physics: Conference Series.1512 012040, 2020.

- PLOTZ, T.; HOPF, M. **Two concepts of radiation. A case study investigating existing preconceptions.** European Journal of Science and Mathematics Education. Vol. 4, n.4, 447-459, 2016.
- POSSENTI, S. “Teoria do discurso: um caso de múltiplas rupturas”, in: F. MUSSALIM e A. BENTES (org.), Introdução à linguística: fundamentos epistemológicos, v.3. São Paulo: Cortez, p. 353- 393, 2004.
- POSSENTI, S. **Os limites do discurso: ensaios sobre discurso e sujeito.** São Paulo: Parábola Editorial, 2009.
- REED, B. C. The Manhattan Project. **Physica Scripta**, v.89, n.10, 2014.
- REGO, F.; PERALTA, L. **Portuguese students' knowledge of radiation physics.** Physics Education, v.41, n.3, p.259-262, 2006.
- RIBEIRO, J. OS “FILHOS DA BOMBA”: memória e história entre os relatos de sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki e a “Campanha pela Proibição das Bombas Atômicas” no Brasil (1950). **Revista Outros Tempos**, v. 6, n. 7, 2009.
- RIBEIRO JUNIOR, J. A. **Um estudo simplificado da percepção pública dos benefícios e riscos de centrais termonucleares sugestões para a comunicação de valor com o público.** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Dissertação de Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Reatores, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- RICARDO, E. C. Educação CTSA: obstáculos e possibilidades para sua implementação no contexto escolar. **Ciência & Ensino**, v. 1, número especial, 2007.
- RUBLECKI, A. Jornalismo científico: problemas recorrentes e novas perspectivas. **Ponto de Acesso.** Salvador, v. 3, n. 3, p. 407-427, 2009.
- RZYSKI, B. M., SARTORI, C. E. **“Avaliação do conhecimento da população paulistana sobre a energia nuclear e os rejeitos radioativos – O acidente de Goiânia despertou o interesse?”.** In: Conferência Internacional sobre o Acidente Goiânia 10 anos depois. CD-ROM, Conselho Nacional de Energia Nuclear, 1997.
- SALES, M. F.; SILVA, J. S.; HARAGUCHI, S. K.; SOUZA, G. A. P. Jornada radioativa: um jogo de tabuleiro para o ensino de radioatividade. **Revista Eletrônica Ludus Scientiae**, v.4, n.2, 2021.
- SAMAGAIA, R. R. Projeto Manhattan: Duas propostas de trabalho utilizando a aprendizagem centrada em eventos. TCC (especialização) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Ciências Físicas e Matemáticas. Física., 2001.

- SAMAGAIA, R; PEDUZZI, L. O. Q. Uma experiência com o projeto Manhattan no ensino fundamental. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 2, p. 259-276, 2004.
- SANTOS; C, E, I; SILVA, L, R, M;BOUFLEUR, L, A; DEBASTIANI, R; STEFENON, C, A; AMARAL, L;YONEAMA, M, L; DIAS, J, F. Elemental characterisation of cabernet sauvignon wines using Particle-Induced X-ray Emission (PIXE),**Food Chemistry**.121, p.44–250, 2010.
- SASSERON, L. H; CARVALHO, A. M. O. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciência**, v. 16, n.1, p. 59-77, 2011.
- SCHIVANI, M.; SOUZA, G. F.; LIRA, N. Programa Nacional do Livro Didático de Física: subsídios para pesquisas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.
- SCHMIDT, L; HORTA, A; PEREIRA, S. O desastre nuclear de Fukushima e os seus impactos no enquadramento midiático das tecnologias de fissão e fusão nuclear. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p.233-250, 2014
- SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks**. Editora Universidade de Brasília: Brasília, 1987, 345p.
- SHOWERS, D. **A Study of the Effects of Informational and Persuasive Messages on the Attitudes of High School Students Toward the Use of Nuclear Energy for Electrical Production**. PhD thesis, Pennsylvania State University, 1986.
- SILVA, A. C. **Uma unidade de ensino sobre radiações e exames de diagnóstico médico por imagem na formação inicial de professores de física**. Programa de Pós-Graduação em Educação. Universidade Estadual de Campinas. 2017.
- SILVA, A. C. **Uma unidade de ensino sobre radiações e exames de diagnóstico médico por imagem na formação inicial de professores de física**. Tese de Doutorado em Educação – Faculdade de Educação, Unicamp, Campinas, 2017.
- SILVA, C. A. S.; MARTINS, M. I. Analogias e metáforas nos livros didáticos de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, 2010.
- SILVA, E. C. **As Radiações Ionizantes na Formação do Professor de Física: um olhar nas revistas especializadas**. Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Universidade Federal da Bahia. 2011.

SILVA, E. C.; PENIDO, M. C. M. Importância da inserção do tópico radiações ionizantes na formação de professores de física. Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, VIII, Campinas: 2011.

SILVA, F. C. V.; CAMPOS, A. F.; ALMEIDA, M. A. V. Concepções alternativas de licenciandos em química sobre radioatividade. **Experiências em Ensino de Ciências** v.8, n.1, 2013.

SOUZA, M. A. M. Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 1: p. 136-158, 2010.

SOUZA, J. S. S. S., JERONIMO V. M. M., PEDROZO M. G. L., QUADROS B. B., SILVA J. P. S., SILVA L. Z. D., TEIXEIRA C. G., GONÇALVES JUNIOR, M. A. A perspectiva do estudante da Escola SESC de Ensino Médio a respeito da geração de energia núcleo-elétrica. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v.07, 2019.

STRATHERN, P. **Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos**. Rio de Janeiro: Zahar, 1999.

TEIXEIRA, P. M. M.; MEGID NETO, J. Uma proposta de tipologia para pesquisas de natureza interventiva. **Ciência e Educação**, Bauru, v. 23, n. 4, p. 1055-1076, 2017.

TEIXEIRA, P. M. M. A diversidade de pesquisas de natureza interventiva dentro da produção acadêmica em ensino de biologia: uma análise teórico-metodológica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.25, n.1, p. 140-158, 2020.

TORRESI, S. I. C.; PARDINI, V. L.; FERREIRA, V. F. Sociedade, divulgação científica e jornalismo científico. **Química Nova**, v. 35, n.3, 2012.

VASCONCELOS, F. C. G. C.; LEÃO, M. B. C. Utilização de recursos audiovisuais em uma estratégia flexquest sobre radioatividade. **Investigações em Ensino de Ciências**,[S. l.], v.17, n. 1, p. 37-58, 2012.

WANG, C.; PAN, R.; WAN, X.; TAN, Y.; XU, L.; HO, C. Immediate psychological responses and associated factors during the initial stage of the 2019 Coronavirus Disease (COVID-19) epidemic among the general population in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.17, n.5, 2020.

XAVIER, C. H. G.; PASSOS, C. M. B.; FREIRE, P. T. C.; COELHO, A. A. O uso do cinema para o ensino de física no ensino médio. **Experiências em Ensino de Ciências**, v.5, n.2, p. 93-106, 2010.

YOSHIMURA, E, M. Física das Radiações: interação da radiação com a matéria.

Revista Brasileira de Física Médica, v. 3, n. 1, pp. 57 - 67, 2009.

ZAMBON, L. B.; TERRAZZAN, E. A. Analogias produzidas por alunos do ensino médio em aulas de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, 2013.

ZHOU, F., YU, T., DU, R., FAN, G., LIU, Y., LIU, Z., CAO, B. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: a retrospective cohort study. **The Lancet**, v.395, p.1054-1062, 2020.

FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

ALBUQUERQUE, I. C. T. C.; RAMOS, M. B. Heróis e vilões: as mídias de ficção científica no ensino de radiações. In: XENPEC, 2015, Águas de Lindoia. **Anais do X Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**. Águas de Lindoia: ABRAPEC, 2015.

BATISTA, C. A. S. **Física moderna e contemporânea no ensino médio: subsídios teórico-metodológicos para a sobrevivência do tópico radioatividade em ambientes reais de sala de aula**. Dissertação de mestrado em Educação em Ciências – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus (BA), 2015.

BONJORNO, J. R. et al. **Física**. São Paulo: FTD. v. 3. 2016.

BORSATO, N. G.; FERNANDES, J. P. A construção de uma sequência sobre física nuclear baseada na perspectiva CTS e no uso do RPG. In: Novos Horizontes –XXII SNEF, 2017, São Carlos (SP). **Atas do XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física**. São Carlos: Sociedade Brasileira de Física, 2017.

CALHEIRO, L. B.; DEL PINO, J. C. O estudo das Representações Sociais de estudantes do ensino médio acerca do tema radiação. In: IX ENPEC, 2015, Águas de Lindoia. **Anais do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**. Águas de Lindoia: ABRAPEC, 2015.

CARDOSO, S, P. **Física das radiações: um enfoque cts para alunos do ensino médio da área industrial**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2017.

COSTA, I. G.; DORES, J. L. R.; LIRA DA SILVA, R. M. Percepção dos estudantes do Ensino Médio da rede pública de Salvador, Bahia sobre energia nuclear. In: VIII ENPEC, 2011, Campinas. **Atas do VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**. Campinas: ABRAPEC, 2011.

DIAS, R. S. **Radioatividade**: um módulo didático para o Ensino Médio. Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Física – Centro Universitário Franciscano, Santa Maria, 2013.

FIUZA, G. S. **Radiações ionizantes e radiações não ionizantes no ensino médio**. Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Física – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande (RS), 2016.

FORTUNATO, D. **Matéria e radiação: articulação entre física e saúde na perspectiva de uma prática docente reflexiva**. Dissertação de Mestrado em Educação em Ciências – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), 2012

FREUDENRICH, C. C. Sci-Fi Science: Using Science Fiction to set Context for Learning Science. **The Science Teacher** v. 67 n. 8, 2000.

FUKE, L, F; YAMAMOTO, K. **Física para o ensino médio**. São Paulo: Saraiva. v. 3. 2016.

GASPAR, A. **Compreendendo a física**. São Paulo: Ática. v. 3. 2016.

GONÇALVES FILHO, A; TOSCANO, C. **Física e realidade**. São Paulo: Scipione. v. 3. 2016.

JESUS, G, S; SILVA, E, A; OLIVEIRA, I, B. Energia nuclear: benefícios ou malefícios? percepção de alunos do ensino médio. **Anais do XVIII Encontro Nacional de Ensino de Química**. Florianópolis (SC), 2016.

LUZ, R. M. **O ensino da física das radiações em ambientes hospitalares: avaliação das concepções sobre raios X com enfoque na prevenção e tecnologia**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2013.

MATOS, A. N.; SANTANA, H. C. V.; BARBOSA, T. N. Análise e desenvolvimento de simuladores na física das radiações. In: XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2017, São Carlos. **Atas do XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física**. São Carlos: USP, 2017.

MONTEIRO, N, A. **Percepção pública da energia nuclear e estratégias para uma melhor comunicação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Nuclear – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio e Janeiro, 2013.

MORAES, L. E.; OLIVEIRA, F. G.; SOARES, A. A. O ensino da radioatividade e física nuclear com o uso de simuladores. In: XXI SNEF, 2015, Uberlândia. **Anais do XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

MOTTA, L. J.; CARDOSO, G. V.; MACEDO, C. C. Produção de energia elétrica através de usinas termonucleares e hidrelétricas: relato de uma atividade envolvendo aulas contextualizadas de física. In:XX SNEF, 2013, São Paulo. **Atas do Simpósio Nacional de Ensino de Física**. São Paulo: USP, 2013.

OLIVEIRA, M. P. P. et al. **Física em contextos**. São Paulo: Editora do Brasil. v. 3. 2016.

PARISOTO, M. F.; MORO, J. T.; MOREIRA, M. A. O ensino de física a partir do estudo da ultrassonografia, da produção e interação da radiação com o corpo humano: uma abordagem contextualizada. In:XIX SNEF, 2011, Manaus.**Anais do XIX Simpósio Nacional de Ensino de Física**. Manaus: Sociedade Brasileira de Física, 2011.

PEREIRA, A. **A física das radiações em sala de aula: do projeto à prática**. Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Física – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PIQUEIRA, R, C. et al. **Física**. São Paulo: Ática. v. 3. 2016.

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**. Tese de Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

SÁ ALVES, T. R. et al. Radioatividade na concepção de estudantes de Angra dos Reis: um estudo investigativo. **Ciência em Tela**, [S. l.], v.5, n.2, p.1-13, 2012.

SANT'ANNA, B. et al. **Conexões com a física**. São Paulo: Moderna. v. 3., 2016.

SANTOS, J. P. et al. Concepções de estudantes do Ensino Médio sobre Radioatividade. In: XENPEC, 2015, Águas de Lindoia. **Anais do X Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**. Águas de Lindoia: ABRAPEC,2015.

SCHEFFLER, G. L.; PINO, J. C. D. A Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud e o Ensino de Radioatividade. **Experiências em Ensino de Ciências**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 29-46, 2013.

SCHMIDT, L; HORTA, A; PEREIRA, S. O desastre nuclear de Fukushima e os seus impactos no enquadramento midiático das tecnologias de fissão e fusão nuclear. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 233-250, 2014.

SHIINO, H. S. et al. Uma proposta para sala de aula sobre a física nuclear e a física de partículas. In:XX SNEF, 2013, São Paulo. **Atas do Simpósio Nacional de Ensino de Física**. São Paulo: USP, 2013.

SILVA, C. X.; BARRETO, F. B. **Física aula por aula**. São Paulo: FTD. v. 3. 2016.

SILVA, M. L. Análise da percepção dos alunos do terceiro ano do Ensino Médio do acidente de Goiânia com o cézio 137. In: XXI SNEF, 2015, Uberlândia. **Anais do XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física**. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Física, 2015.

SILVA, R. C. **Ensino de radiações ionizantes por meio de produção de vídeos por alunos da 3ª série do ensino médio**. Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande (MS), 2012.

SOARES; A. A.; MORAES, L. E.; OLIVEIRA, F. G. Ensino de matéria e radiação no ensino médio com o auxílio de simuladores interativos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 32, n. 3, p. 915-933, jun. 2015.

SORPRESO, T. P. **Organização de episódios de ensino sobre a questão nuclear para o ensino médio: foco no imaginário dos licenciandos**. Dissertação de Mestrado em Educação – Faculdade de Educação, Unicamp, Campinas, 2008.

SORPRESO, T. P. **Energia nuclear mediante o enfoque Ciência, Tecnologia e Sociedade na formação inicial de professores de Física**. Tese de Doutorado em Educação – Faculdade de Educação, Unicamp, Campinas, 2013.

SORPRESO, T. P.; LONDERO, L.; PEREIRA, G. A. S. Conhecimentos físicos manifestados por alunos após o uso do recurso fílmico do gênero herói e heroína. **Revista de Enseñanza de la Física**. v. 27, n. extra, p. 61-67, 2015.

SOUZA, R, S. **Uma sequência didática para o ensino de física nuclear no ensino médio**. Dissertação de Mestrado Física – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2018.

STEFANOVITS, A. **Física**. São Paulo: Coleção Ser Protagonista. v. 3. 2016.

TORRES, C, M, A. et al. **Física ciência e tecnologia**. São Paulo: Editora Moderna. v. 3. 2016.