UNESP - Universidade Estadual Paulista

“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Ciências – Campus de Bauru

Programa de Pós Graduação em Educação para a Ciência

Alvaro Cesar da Silva Junior

A responsabilidade social dos cientistas: uma análise acerca das discussões sobre o Projeto Manhattan em manuais escolares de física

Bauru

2023

UNESP - Universidade Estadual Paulista

“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Ciências – Campus de Bauru

Programa de Pós Graduação em Educação para a Ciência

Alvaro Cesar da Silva Junior

A responsabilidade social dos cientistas: uma análise acerca das discussões sobre o Projeto Manhattan em manuais escolares de física

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Educação para a Ciência da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como um dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Educação para a Ciência – Área de concentração: Ensino de Ciências e Matemática.

Orientador: Leandro Londero da Silva

Bauru

2023

Da Silva Junior, Alvaro Cesar.
A responsabilidade social dos cientistas: uma análise acerca das discussões sobre o Projeto Manhattan em manuais escolares de física / Alvaro Cesar da Silva Junior. -- Bauru, 2023.
220 p.

Orientador: Leandro Londero da Silva

Dissertação (Mestrado)–Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Ciências, Bauru, 2023.

1. Projeto Manhattan. 2. Responsabilidades Sociais dos cientistas. 3. PNLD. 4. Ensino de física. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALVARO CESAR DA SILVA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 24 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 DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALVARO CESAR DA SILVA JUNIOR, intitulada **A responsabilidade social dos cientistas: uma análise acerca das discussões sobre o Projeto Manhattan em manuais escolares de física**. 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. CRISTIANO RODRIGUES DE MATTOS (Participação Presencial) do(a) Departamento de Física Aplicada / Universidade de São Paulo, Prof. Dr. EDUARDO ADOLFO TERRAZZAN (Participação Presencial) do(a) Departamento de Educação / Universidade Federal de Santa Maria. Após a exposição pelo mestrando 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.

gov.br Documento assinado digitalmente
LEANDRO LONDERO DA SILVA
Data: 28/09/2023 15:42:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Assoc. LEANDRO LONDERO DA SILVA

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por todo apoio, carinho e companhia durante a desenvolvimento da pesquisa, e por fornecerem as bases necessárias que me possibilitaram chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leandro Londero, pelos ensinamentos acerca da pesquisa em ensino de física, e também pelas inúmeras discussões e contribuições ao tema de minha pesquisa.

Aos membros do grupo de pesquisa “Susana Lehrer de Souza Barros”, pelas inúmeras trocas de ideias, que me deram motivação e me mostraram novos modos de pensar a prática científica.

Aos professores Dr. Cristiano Rodrigues De Mattos e Dr. Eduardo Adolfo Terrazzan, por terem aceito participar da banca de qualificação e defesa do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento: 88887.622603/2021-00

RESUMO

Por muito tempo a prática científica foi compreendida como uma atividade neutra, voltada exclusivamente à produção de novos conhecimentos, entretanto, com as transformações sociais causadas pelo desenvolvimento tecnológico e com estudos acerca da natureza da ciência, tal concepção se mostrou equivocada, de modo que a pesquisa científica passou a ser reconhecida como uma prática social, influenciada por fatores externos que definem os fins e o modo como a ciência é realizada. Com o aprofundamento das contradições sociais através do desenvolvimento de tecnologias bélicas, surgiram trabalhos que argumentaram a favor de uma prática científica socialmente responsável, capaz de refletir sobre suas consequências e com objetivo de atender a demandas sociais, tais discussões formaram o conceito de Responsabilidade Social dos Cientistas. Consideramos que trabalhar estas responsabilidades no ensino permite discutir aspectos diversos relacionados à natureza da ciência. Para tanto, entendemos que abordagens acerca da história e filosofia da ciência, como a análise de episódios históricos, contribuam para este objetivo. Selecionamos o episódio conhecido como “Projeto Manhattan”, que corresponde a pesquisas com objetivo de produzir as armar nucleares lançadas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, modificando a estrutura geopolítica na segunda metade do século XX. Assim, buscamos refletir acerca da apresentação das Responsabilidades Sociais dos Cientistas em manuais escolares destinados ao ensino de Ciências/Física, especificamente ao abordar conteúdos relacionados ao “Projeto Manhattan”. Para isso, avaliamos o modo como as coleções didáticas de física, pertencentes ao Programa Nacional do Livro e do Material Didático, trabalharam o episódio, de modo a evidenciar possibilidades para discussões sobre as responsabilidades sociais dos cientistas através do material. A análise foi realizada a partir das diferentes dimensões das responsabilidades sociais: a responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa, a responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social e a responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos. Encontramos que todas as dezenove coleções apresentaram trechos voltados aos saberes históricos, entretanto, apenas três delas discutiram o tema de modo a evidenciar a ciência como um processo complexo e historicamente inserido. Destes trechos, foi observada a possibilidade de abordar aspectos relacionados às responsabilidades sociais dos cientistas, como: as implicações sociais das pesquisas, o modo como os cientistas lidam com as consequências de seu trabalho, as influências políticas e econômicas no direcionamento da pesquisa e a relevância social da ciência. Entretanto, discussões sobre a importância da comunicação entre os pesquisadores e a sociedade se fizeram ausentes nas coleções.

Palavras – chave: Projeto Manhattan, Responsabilidades Sociais dos cientistas, PNLD, ensino de física.

ABSTRACT

For a long time, scientific practice was understood as a neutral activity, aimed exclusively at the production of new knowledges, however, with the social transformations caused by technological development and with studies about the nature of science, this conception proved to be wrong, so that the scientific research came to be recognized as a social practice, influenced by external factors that define the purposes and the way science is executed. With the deepening of social contradictions through the development of war technologies, studies emerged that argued in favor of a socially responsible scientific practice, capable of reflecting on its consequences and with the objective of attend social demands, such discussions formed the concept of Social Responsibility of Scientists. We believe that working with these responsibilities in teaching allows us to discuss different aspects related to the nature of science. Therefore, we understand that approaches to the history and philosophy of science, such as the analysis of historical episodes, contribute to this goal. We selected the episode known as the “Manhattan Project”, which corresponds to the researches with the purpose of producing the nuclear weapons launched in the cities of Hiroshima and Nagasaki, modifying the geopolitical structure in the second half of the 20th century. Thus, we seek to reflect on the presentation of the Social Responsibilities of Scientists in school manuals intended for teaching Science/Physics, specifically when addressing content related to the “Manhattan Project”. For this, we evaluated how the didactic collections of physics, belonging to the “Programa Nacional do Livro e do Material Didático”, worked on the episode, in order to highlight possibilities for discussions about the social responsibilities of scientists through the material. The analysis was accomplished from the different dimensions of social responsibilities: the responsibility to reflect on the consequences of the research, the responsibility to seek to produce science with social relevance and the responsibility to communicate and advise the public and governments. We found that all nineteen collections presented excerpts focused on historical knowledge, however, only three of them discussed the theme in order to highlight science as a complex and historically inserted process. From these sections, the possibility of approach aspects related to the social responsibilities of scientists was observed, such as: the social implications of research, the manner of how scientists deal with the consequences of their work, the political and economic influences on the research directio and the social relevance of science. However, discussions about the importance of communication between researchers and society were absent from the collections.

Keywords: Manhattan Project, Social Responsibilities of Scientists, PNLD, physics education.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Capa das principais fontes secundárias consultadas..... **24**
FIGURA 2 - Representações de moléculas feitas por John Dalton..... **26**
FIGURA 3 - O espectroscópio de Bunsen e Kirchhoff..... **27**
FIGURA 4 - Representações de chapas fotográficas mostrando as diferentes linhas espectrais no efeito Zeeman..... **29**
FIGURA 5 - Representações dos procedimentos experimentais realizados por Thomson em 1897..... **32**
FIGURA 6 - Primeira radiografia realizada por Röntgen da mão de sua esposa..... **33**
FIGURA 7 - Representação da chapa fotográfica revelada por Becquerel..... **34**
FIGURA 8 - Representação esquemática do equipamento utilizado por Marie Curie para medir a ionização do ar provocada pela radioatividade..... **36**
FIGURA 9 - Curva de crescimento e decaimento da atividade..... **38**
FIGURA 10 - Representação esquemática do equipamento utilizado por Geiger..... **42**
FIGURA 11 - Trajetória de uma partícula α desviada por um núcleo..... **43**
FIGURA 12 - Arranjo experimental utilizado na transmutação artificial..... **48**
FIGURA 13 - Representação esquemática do equipamento utilizado por Chadwick para o estudo do nêutron..... **51**
FIGURA 14 - Desenho do primeiro reator nuclear construído, denominado Chicago Pile 1..... **64**
FIGURA 15 - Mecanismos para detonação da bomba..... **65**
FIGURA 16 - Acampamento Base construído para o teste Trinity..... **67**
FIGURA 17 - Norris Bradbury com a bomba “Gadget” no topo da torre..... **68**
FIGURA 18 - Teste Trinity, 15 segundos após a detonação..... **68**
FIGURA 19 - O local do teste após a explosão da “Gadget” **70**
FIGURA 20 - Líderes da Inglaterra (Winston Churchill), EUA (Harry S. Truman) e União Soviética (Josef Stalin) durante a Reunião de Potsdam... **73**
FIGURA 21 - Bomba de urânio Little Boy, pronta para ser levada ao avião..... **75**

FIGURA 22 - Bomba de plutônio Fat Man em transporte..... **76**
FIGURA 23 - Hiroshima (à esquerda) e Nagasaki (à direita) após as explosões..... **76**
FIGURA 24 - Atol de Bikini em 1954..... **130**
FIGURA 25 - Explosão da bomba e a cidade de Nagasaki após o bombardeio em 1945..... **134**
FIGURA 26 - Questões que fazem referência às bombas atômicas encontradas na CD18.01..... **131**
FIGURA 27 - Explosão de uma bomba atômica..... **137**
FIGURA 28 - Abertura da Assembleia das Nações Unidas sobre o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares..... **138**
FIGURA 29 - Fotografia de Niels Bohr (à esquerda) e Werner Karl Heisenberg (à direita) **142**
FIGURA 30 - Fotografia tirada no Pacífico Sul, em outubro de 1952..... **143**
FIGURA 31 - Material de apoio para solução das questões EP11 e EP12... **145**
FIGURA 32 - Bomba “Fat Man”, lançada sob Nagasaki, em 1945 ..... **147**
FIGURA 33 - Explosão da primeira bomba de hidrogênio, no Atol de Eniwetok, em 1952..... **148**
FIGURA 34 - Explosão de uma bomba atômica sob o Atol de Bikini em 1946..... **151**
FIGURA 35 - Questão que apresenta conteúdos históricos, evidenciada na CD 18.07..... **152**
FIGURA 36 - Cidade de Hiroshima após o lançamento das bombas..... **158**
FIGURA 37 - Questão que evidencia saberes históricos, presente na CD18.11..... **159**
FIGURA 38 - Exemplo de linha do tempo com os principais episódios acerca da radioatividade..... **163**
FIGURA 39 - Réplica da bomba atômica *Little boy* lançada em Hiroshima, Japão, em 1945..... **165**
FIGURA 40 - Atividade acerca das aplicações das reações nucleares..... **165**
FIGURA 41 - Atividade que explicita pautas de pesquisa acerca dos acontecimentos históricos envolvendo a produção de armas nucleares..... **166**
FIGURA 42 - Ruínas de Hiroshima cerca de um mês após as explosões.... **172**

FIGURA 43 - Explosão da primeira bomba de hidrogênio testada, em 1952, no Atol Eniwetok..... **173**
FIGURA 44 - Explosão nuclear realizada durante um exercício nuclear em Mururoa..... **177**
FIGURA 45 - Ruínas das cidades de Hiroshima (à direita) e Nagasaki (à esquerda) após os bombardeios com bombas atômicas em 1945..... **180**

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Obstáculos para a implementação da HFC no ensino de Física..... **21**
QUADRO 2 - Diferentes tradições de pensamento sobre as responsabilidades dos cientistas..... **80**
QUADRO 3 - Responsabilidades acadêmicas dos cientistas..... **109**
QUADRO 4 - Responsabilidades sociais dos cientistas..... **110**
QUADRO 5 - Categorias de análise das RSC..... **118**
QUADRO 6 - Coleções didáticas aprovadas pelo PNLD (2018-2021) para a componente curricular de Física..... **123**
QUADRO 7 - Coleções didáticas aprovadas pelo PNLD (2021-2024) para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias..... **125**
QUADRO 8 - Identificação das coleções pertencentes ao PNLD 2018-2021 que abordam a produção de armamentos nucleares..... **126**
QUADRO 9 - Identificação das coleções pertencentes ao PNLD 2021-2024 que abordam a produção de armamentos nucleares..... **126**
QUADRO 10 - Ficha de Análise para as RSC nos manuais escolares selecionados..... **128**
QUADRO 11 - Evidência das RSC em meio a CD18.01..... **133**
QUADRO 12 - Evidência das RSC em meio a CD18.02..... **139**
QUADRO 13 - Evidência das RSC em meio a CD18.03..... **141**
QUADRO 14 - Evidência das RSC em meio a CD18.04..... **145**
QUADRO 15 - Evidência das RSC em meio a CD18.05..... **149**
QUADRO 16 - Evidência das RSC em meio a CD18.06..... **151**
QUADRO 17 - Evidência das RSC em meio a CD18.07..... **154**
QUADRO 18 - Evidência das RSC em meio a CD18.08..... **155**
QUADRO 19 - Evidência das RSC em meio a CD18.09..... **156**
QUADRO 20 - Evidência das RSC em meio a CD18.10..... **158**
QUADRO 21 - Evidência das RSC em meio a CD18.11..... **160**
QUADRO 22 - Evidência das RSC em meio a CD18.12..... **161**
QUADRO 23 - Volumes que compõem a CD21.01..... **161**
QUADRO 24 - Evidência das RSC em meio a CD21.01..... **163**

QUADRO 25 - Volumes que compõem a CD21.02..... **164**
QUADRO 26 - Evidência das RSC em meio a CD21.02..... **167**
QUADRO 27 - Volumes que compõem a CD21.03..... **168**
QUADRO 28 - Evidência das RSC em meio a CD21.03..... **169**
QUADRO 29 - Volumes que compõem a CD21.04..... **170**
QUADRO 30 - Evidência das RSC em meio a CD21.04..... **173**
QUADRO 31 - Volumes que compõem a CD21.05..... **174**
QUADRO 32 - Evidência das RSC em meio a CD21.05..... **176**
QUADRO 33 - Volumes que compõem a CD21.06..... **176**
QUADRO 34 - Evidência das RSC em meio a CD21.06..... **179**
QUADRO 35 - Volumes que compõem a CD21.07..... **179**
QUADRO 36 - Evidência das RSC em meio a CD21.07..... **182**
QUADRO 37 - Quadro síntese dos agrupamentos das coleções..... **185**
QUADRO 38 - Indicação dos tópicos de física em que foram evidenciadas menções ao tema de pesquisa..... **186**
QUADRO 39 - Síntese dos recursos utilizados para abordar o desenvolvimento de armamentos nucleares..... **187**
QUADRO 40 - Momentos nos quais o desenvolvimento de armamentos nucleares é mencionado..... **190**
QUADRO 41 - Distribuição das CDs quanto à contemplação das questões referentes às categorias prévias de análise sobre as RSC..... **192**
QUADRO 42 - Aplicações tecnológicas evidenciadas nas coleções..... **198**

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO..... 14

INTRODUÇÃO..... 17

1. UMA BREVE HISTÓRIA SOBRE O PROJETO MANHATTAN..... 22

1.1 Caminhos para uma física nuclear: da compreensão do átomo à concepção do núcleo..... **25**

1.2 Física nuclear: da transmutação artificial à fissão nuclear..... **47**

1.3 O Projeto Manhattan **56**

1.4 As consequências do Projeto Manhattan para a Física e para a sociedade..... **72**

2. AS RESPONSABILIDADES SOCIAIS DOS CIENTISTAS..... 79

2.1 As Responsabilidades Sociais para integrantes do Projeto Manhattan..... **81**

2.2 Primeiro período: da responsabilidade sobre as implicações da pesquisa científica..... **85**

2.3 Segundo período: sobre a ética na ciência e a pesquisa socialmente responsável..... **97**

2.4 Conceito, fundamentos e caracterização das responsabilidades sociais dos cientistas..... **105**

3. METODOLOGIA DA PESQUISA..... 113

3.1 Questões, objetivo e natureza da pesquisa..... **113**

3.2 Desenvolvimento da pesquisa..... **117**

3.2.1 Aprofundamento teórico e construção das categorias de análise..... **117**

3.2.2 Análise Preliminar das coleções didáticas..... **119**

3.2.2.1 Conhecendo o Programa Nacional do Livro e do Material Didático..... **119**

3.2.2.2 Identificação dos conteúdos..... **125**

3.2.3 Procedimento de análise..... **127**

4. RESULTADOS..... 129

4.1 PNLD (2018-2020) **129**

4.1.1 CD18.01 - Bonjorno et al. (2016) **129**

4.1.2 CD18.02 - Barreto e Xavier (2016) **136**
4.1.3 CD18.03 - Válio et al. (2016) **140**
4.1.4 CD18.04 - Kazuhito e Fuke (2016) **141**
4.1.5 CD18.05 - Torres et al. (2016) **146**
4.1.6 CD18.06 - Pietrocola et al. (2016) **149**
4.1.7 CD18.07 - Guimarães, Piqueira e Carron (2016)..... **152**
4.1.8 CD18.08 - Biscuola et al. (2016) **155**
4.1.9 CD18.09 - Máximo e Alvarenga (2016) **155**
4.1.10 CD18.10 - Gaspar (2016) **156**
4.1.11 CD18.11 - Aurélio Filho e Toscano (2016) **158**
4.1.12 CD18.12 - Sant'Anna et al. (2016) **160**
4.2 PNLD (2021-2024) **161**
4.2.1 CD21.01 - Mortimer et al. (2020) **161**
4.2.2 CD21.02 - Godoy, Dell'agnolo e Melo (2020) **163**
4.2.3 CD21.03 - Lopes e Rosso (2020) **168**
4.2.4 CD21.04 - Amabis et al. (2020) **170**
4.2.5 CD21.05 – Fukui et al. (2020) **174**
4.2.6 CD21.06 - Thompson et al. (2020) **176**
4.2.7 CD21.07 - Santos et al. (2020) **179**
4.3 Observações Gerais **182**
4.3.1 O Projeto Manhattan nas coleções didáticas analisadas ... **183**
4.3.2 As Responsabilidades Sociais dos Cientistas **192**
4.3.2.1 Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa **193**
4.3.2.2 Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social **196**
4.3.2.3 Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos **198**
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 202
Referências 208

APRESENTAÇÃO

Para que seja possível compreender as indagações que me levaram a propor a presente pesquisa, faz-se necessário conhecer um pouco de minha trajetória pessoal. Para tanto, dedico estas páginas iniciais à apresentação desta trajetória, de maneira a evidenciar os desdobramentos que me levaram a este projeto.

Meu interesse pela ciência teve início durante o segundo ano do ensino fundamental, em 2007, ano em que participei da 10ª Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA), para qual me preparei por diversos dias com acompanhamento de minha família e professores, tendo conquistado medalha de ouro. Tais estudos me despertaram o desejo de trabalhar com a física e me tornar cientista.

No ano de 2017, iniciei o curso de Física no Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Unesp, campus de São José do Rio Preto. Ao longo do primeiro ano, tanto disciplinas voltadas para a física em sociedade quanto meu envolvimento em projetos de extensão, me despertaram profundo interesse pela licenciatura, uma vez que percebi a variedade e profundidade das pesquisas do campo educacional.

Já no início de 2018, fui convidado pelo Prof. Dr. Leandro Londero da Silva a participar da Equipe de Educação em Física “Susana Lehrer de Souza Barros”, cujas pesquisas, naquele momento, voltavam-se ao estudo da inserção de conteúdos da Física do Século XX na educação básica, a partir de referenciais teóricos diversificados.

Em minha primeira pesquisa, intitulada “A transposição didática da física das radiações ionizantes em manuais escolares de física”, investiguei como a Física das Radiações Ionizantes e o fenômeno da Radioatividade eram abordados pelas Coleções Didáticas de Física, destinadas ao Ensino Médio e pertencentes ao Programa Nacional do Livro Didático do governo federal, sob o olhar da teoria da Transposição Didática de Yves Chevallard. Tal investigação me fez concluir que o contexto histórico das pesquisas cientificas é por vezes ignorado pelas coleções, ao optar por uma textualização conceitual, em detrimento de discussões voltadas à natureza da ciência.

Ainda, durante a graduação e de maneira paralela à iniciação científica, diversas disciplinas me apresentaram uma ampla gama de trabalhos que apontavam ganhos significativos ao abordar a física a partir da História e Filosofia da Ciência. Estes trabalhos intensificaram minhas indagações e interesse a respeito do tema, tendo me levado a inserir em minhas pesquisas questões que buscavam avaliar a presença de imagens deformadas do trabalho científico nas Coleções Didáticas.

Entretanto, no ano de 2020 fui surpreendido por duas ideias legislativas que versavam sobre a fabricação de bombas atômicas brasileiras. Tais ideias se mostraram esvaziadas de informações sobre o contexto nuclear mundial, ainda assim, ambas alcançaram uma grande quantidade de votos favoráveis. Ao questionar diversas pessoas, notei um forte desconhecimento sobre o tema, tanto a respeito do processo de fabricação das bombas quanto de suas consequências para a sociedade.

Ainda, durante as reuniões de nossa equipe de pesquisa, passamos a investigar e discutir sobre questões relacionadas à ética do trabalho científico, dentre elas, sobre a importância de uma conduta responsável e de um olhar para as implicações sociais do conhecimento produzido pelos cientistas.

Deste modo, este trabalho versa sobre o ensino das Responsabilidades sociais dos cientistas a partir do processo histórico da aplicação de pesquisas nucleares para fins militares, empreendimento científico que está intrinsicamente vinculado a mudanças de concepções éticas sobre a atividade científica.

Para tanto, busco avaliar a exposição sobre o processo de desenvolvimento de armamentos nucleares, a partir do episódio histórico denominado Projeto Manhattan, em livros didáticos destinados ao ensino básico, afim de compreender de quais modos tais exposições permitem discussões voltadas às Responsabilidade Sociais dos Cientistas.

Apresento a seguir a descrição do conteúdo dos capítulos que compõem o relato de minha pesquisa.

Durante a introdução do trabalho, busco contextualizar o tema proposto e apresentar minhas justificativas sobre a importância e relevância do mesmo, a partir de trabalhos que fundamentam a inserção de temas relacionados à história, filosofia e sociologia da ciência no ensino de física.

No primeiro capítulo busco descrever o episódio histórico denominado Projeto Manhattan, no qual se deu a construção das duas bombas lançados ao final da segunda guerra mundial, nas cidades de Hiroshima e Nagasaki. Para tanto, apresento inicialmente as pesquisas que conduziram ao contexto científico necessário para o projeto, desde a compreensão sobre o átomo à concepção do núcleo, em seguida, descrevo o processo de fabricação das bombas e, por fim, as principais consequências do Projeto Manhattan para o contexto científico e social.

No segundo capítulo, apresento e descrevo a Responsabilidade Social dos cientistas. Em um primeiro momento, disserto acerca das discussões ocorridas durante o desenvolvimento das bombas, iniciadas por pesquisadores de grande influência para o estabelecimento e realização do PM. Em seguida, apresento o desenvolvimento da compreensão das responsabilidades sociais dos cientistas ao longo dos anos. Por fim, apresento o conceito de Responsabilidade que utilizarei, tal qual a caracterização destas responsabilidades.

O terceiro capítulo descreve a natureza da pesquisa, os procedimentos metodológicos utilizados, os critérios de seleção dos manuais analisados e a apresentação dos critérios selecionados para análise dos manuais.

No quarto capítulo, apresento os resultados do trabalho, para isso, realizo discussões particulares para cada obra, observando a apresentação dos saberes históricos e as possibilidades para o ensino das responsabilidades sociais. Ao fim do capítulo, apresento observações gerais sobre os resultados, onde evidencio as semelhanças na abordagem das obras acerca do tema.

Finalizo com a apresentação de minhas considerações finais acerca das investigações realizadas, afim de responder ao problema de pesquisa e às questões norteadoras, buscando implicações para o ensino das Responsabilidade Sociais dos cientistas a partir do ensino de física.

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, diversas pesquisas científicas modificaram as maneiras pelas quais os seres humanos se relacionam entre si e com o meio ambiente. A ciência, como empreendimento humano, se mostrou fundamental para a construção da sociedade que conhecemos atualmente, tendo sido aplicada em diversos setores, a fim de solucionar problemas ou potencializar as maneiras de produção. Entretanto, apesar da capacidade em proporcionar melhorias na qualidade de vida e no bem-estar social, a ciência foi, por outro lado, amplamente aplicada para o desenvolvimento de tecnologias bélicas, que ao longo dos anos, têm modificado a dinâmica dos conflitos sociais.

Dos empreendimentos científicos voltados para a guerra, destaca-se o episódio histórico denominado Projeto Manhattan, doravante PM, responsável pelo desenvolvimento e fabricação das primeiras bombas nucleares. Tendo se originado da colaboração entre os governos estadunidense e britânico, com intuito de combater a Alemanha nazista, o PM empregou mais de 120 mil pessoas, além de cientistas de toda a Europa, e se caracterizou como o maior empreendimento científico-industrial já realizado (CARVALHO, 2015). Por outro lado, tais esforços resultaram na destruição das cidades de Hiroshima e Nagasaki após o lançamento das bombas.

> Em vez de terem contribuído para melhorar a condição humana e a qualidade da vida das pessoas, os saberes, acumulados pelos cientistas durante décadas de estudos – e a fortuna investida nas pesquisas e fabricação das bombas atômicas –, resultaram no sacrifício de centenas de milhares de seres humanos inocentes, no Japão. (CARVALHO, 2015, p. 207)

Para além da produção de bombas atômicas, o PM influenciou diretamente o ordenamento geopolítico durante o pós-guerra, a partir do estabelecimento de novos centros de poder e de tratados que visavam controlar o desenvolvimento nuclear global. No âmbito científico, o episódio foi fundamental no sentido de estabelecer o sigilo como prática (SEGRÈ, 1987), e suscitar discussões voltadas à responsabilidade social dos cientistas (MITCHAM, 1987).

Em 2020 os brasileiros foram surpreendidos com a notícia da tramitação de uma consulta pública acerca da proposta da criação de uma Bomba Nuclear

Brasileira. A ideia legislativa foi apresentada por meio do portal e-cidadania, intitulada “Bomba Atômica Brasileira”, com a seguinte descrição: “As forças Armadas Brasileiras necessitam da bomba nuclear para dissuadir interferência estrangeira em nosso território nacional” (BRASIL, 2020a).

A proposta alcançou apoio necessário para ser levada ao Senado em menos de um mês após sua publicação, com um total de 20.892 votos. No momento da redação deste trabalho, a proposta se encontra em consulta pública, com um total de 30.750 votos favoráveis e 5.126 votos contrários, e aguarda para ser discutida pela Comissão de Direitos Humanos e Legislação Participativa (CDH).

Tal quantitativo chamou a atenção da Sociedade Brasileira de Física (SBF) que expôs suas preocupações em relação a essa consulta. O apontamento da SBF tem como fundamento o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP), que “tem contribuído para a manutenção da paz mundial”, ainda, a sociedade diz que:

> Devemos considerar que o possível financiamento de um tal projeto poderia causar ainda mais cortes no financiamento da ciência que vem sendo desenvolvida no Brasil. Na área nuclear, a operacionalização de Angra 3 e a construção do reator multipropósito, que garantiria a produção de radiofármacos dos quais o país necessita e que importa a custos altíssimos, são necessidades urgentes que precisam de financiamento. (SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA, 2020)

Ainda, no dia 31 de dezembro de 2020, outra ideia legislativa alcançou o quantitativo necessário para tramitar na CDH, denominada “Rompimento com o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares”, na qual busca facilitar “a confecção de armamentos nucleares destinados a defesa nacional e de seus interesses” (BRASIL, 2020b). A proposta se encontra em consulta pública com mais de 24.000 votos favoráveis contra 1.400 desfavoráveis.

Tais quantitativos, seguidos da ausência de uma reflexão crítica acerca da proposta, demonstram haver certo desconhecimento por parte da população a respeito do processo histórico e político para o desenvolvimento e manutenção das bombas atômicas.

Por sua vez, Rzyski e Sartori (2010), a partir de um questionário de múltipla escolha, buscaram compreender a tendência do conhecimento da população paulistana acerca da energia nuclear e dos rejeitos radioativos. A pesquisa foi realizada em 1996, quase dez anos após o acidente de Goiânia, com participação de uma amostra diversificada em sexo, faixa etária, escolaridade e faixa salarial.

As autoras observaram que a maioria dos entrevistados desconheciam as aplicações da energia nuclear, tais como geração de energia, bombas, irradiação de alimentos, dentre outras. Entretanto, relatam haver curiosidade por parte dos entrevistados em compreender melhor tais aplicações, tendo em vista que muitas vezes a circulação de notícias sensacionalistas ou equivocadas amedronta a população.

De modo semelhante, ao avaliar os conhecimentos prévios de alunos do curso de licenciatura em física, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP-SP), acerca da história do uso da energia nuclear, Schmiedecke e Porto (2014, p. 239) encontraram que, apesar de estarem familiarizados com os saberes teóricos, estes estudantes “pouco conhecem a respeito de seu desenvolvimento histórico em nível mundial e, mais claramente, nacional”. Os autores ainda acrescentam que episódios como o Projeto Manhattan podem despertar diversas discussões, “tanto em termos de contextualização do conhecimento físico, como a respeito da natureza da ciência” (SCHMIEDECKE E PORTO, 2014, p. 239).

Tendo em vista a maneira como as ideias legislativas foram recebidas pelo público, assim como as pesquisas acima e minha experiência como aluno e professor de física, suponho haver certa ausência de conhecimento por parte da população sobre temas relacionados a energia nuclear e suas aplicações tecnológicas, movidos por meio de estereótipos ou falsos discursos, estes esvaziados de crítica e saberes científicos.

Neste sentido, ao analisar as percepções de um grupo de estudantes acerca das usinas nucleares e do resíduo radioativo, Gombrade e Londero, (2022) evidenciam que esta veiculação de estereótipos e notícias equivocadas a respeito da energia nuclear impacta a produção discursiva dos alunos, resultando em um distanciamento para com o saber científico.

Ao olhar do ponto de vista histórico, discussões acerca do processo de fabricação das bombas atômicas nos remete ao contexto pelo qual estas foram desenvolvidas, tal como das consequências científicas e políticas que marcaram a humanidade no século XX. Do ponto de vista educacional, destaca-se a necessidade de discutir o processo histórico do desenvolvimento do saber e de suas aplicações tecnológicas, tendo em vista a importância da compreensão destes processos para que o aluno seja capaz de avaliar suas decisões em uma sociedade pautada pelas tecnologias modernas.

Em vista disso, nos últimos anos diversas pesquisas têm discutido a necessidade de se trabalhar conteúdos relacionados à física nuclear em diferentes níveis de ensino (p. ex.: SOUZA E CUNHA, 2018; REIS, 2021; SOUZA E DANTAS, 2010; WERNER DA ROSA et al., 2021; ADORNES et al., 2018).

Nota-se que, dentre este campo de pesquisa, destacam-se argumentos voltados à importância de olhar para a inserção da História, Filosofia e Sociologia da Ciência (HFSC) no ensino de física, uma vez que tem contribuído para: motivar os alunos, facilitar a interdisciplinaridade, apresentar a ciência como uma construção humana, evitar visões deformadas do trabalho científico, dentre outros (RODRIGUES JUNIOR et al., 2015).

Estudar os saberes científicos, a partir da compreensão de um dado contexto histórico, possibilita refletir sobre o processo de produção do conhecimento e o modo como a prática científica está atrelada à estrutura social, seja por meio de relações políticas, econômicas ou sociais. Tais discussões podem se configurar como um modo de combater o mito da neutralidade científica, evidenciando a dimensão humana da pesquisa científica.

Portanto, a inserção de temas relacionados à HFSC promove discussões sobre aspectos do desenvolvimento científico e tecnológico a partir do processo de produção do conhecimento, este contexto permite evidenciar elementos vinculados à natureza da ciência, de maneira crítica e reflexiva.

Se voltarmos nosso olhar para documentos curriculares que balizam a educação brasileira, como é o caso da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), ela explicita que a contextualização social, histórica e cultural é

fundamental para que áreas como ciência e tecnologia sejam compreendidas como empreendimentos humanos e sociais. Ainda:

> A contextualização histórica não se ocupa apenas da menção a nomes de cientistas e a datas da história da Ciência, mas de apresentar os conhecimentos científicos como construções socialmente produzidas, com seus impasses e contradições, influenciando e sendo influenciadas por condições políticas, econômicas, tecnológicas, ambientais e sociais de cada local, época e cultura. (BRASIL, 2017, p. 550)

Entendo que, para que esta contextualização histórica seja possível, é necessário que professores, espaços e materiais educacionais estejam preparados para a proposta. Entretanto, existem diversos fatores que dificultam a HFC adentrar de maneira significativa no sistema de ensino.

Afim de investigar as principais dificuldades acerca do uso da HFC para fins didáticos, Martins (2007) aplicou um questionário a 82 sujeitos, dentre os quais haviam licenciandos, alunos de pós-graduação e professores da rede pública. Dentre as dificuldades mais citadas durante a investigação, nota-se: a falta de material didático adequado e a ausência desse tipo de conteúdo nos livros existentes, o currículo escolar voltado para os exames vestibulares e a falta de incentivo durante a formação de professores para lidar com o tema.

Por sua vez, Höttecke e Silva (2011) organizam em quatro categorias os principais obstáculos para a implementação da HFC, apontados e discutidos em reuniões e conferências internacionais promovidas pelo projeto *History and Philosophy in Science Teaching* (HIPST)[1].

Quadro 1 – Obstáculos para a implementação da HFC no ensino de Física

Obstáculo	Implicações para o ensino
Cultura do ensino de física	• Os professores apenas transmitem o conteúdo científico. Já os ambientes de ensino são pensados para viabilizar esta transmissão apenas por meio da fala do professor; • A Física é ensinada como uma verdade absoluta ou uma coleção de fatos.

[1] O HIPST foi um projeto empreendido pela União Europeia, entre os anos de 2008 e 2010, com objetivo de aumentar a compreensão da relação entre ciência, tecnologia e sociedade e promover a educação científica e a compreensão pública da ciência a partir da História. O projeto contou com a participação de 10 grupos de pesquisa em 8 diferentes países, sendo eles: Alemanha, Portugal, Grã-Bretanha, Israel, Grécia, Itália, Hungria e Polônia. Mais informações em: https://cordis.europa.eu/project/id/217805

Obstáculo	Implicações para o ensino
Habilidades, atitudes e crenças epistemológicas dos professores	• Os professores não pensam a natureza da ciência como um objetivo explícito de ensino; • Professores de física tendem a não valorizar o conhecimento meta-científico como um conteúdo ensinável; • Se os professores apreciam a história da ciência, eles se concentram principalmente em aprender sobre o contexto, mas se sentem inseguros em ensinar a ciência como um processo.
Ausência de material didático adequado	• São evidenciadas narrativas históricas que reforçam uma concepção empírico-indutivista e ingênua da ciência; • Influências sociais e culturais raramente são discutidas; • Conteúdos históricos são tidos como complementares, separados do aprendizado de conceito científicos; • Atividades voltadas ao aprendizado da natureza da ciência estão ausentes.
Limites institucionais	• Os documentos educacionais são fatores importantes para promover a inclusão ou exclusão da HFC no ensino; • A HFC é um objetivo global, mas sofre de uma operacionalização para estratégias de implementação efetiva; • Os professores são fortemente guiados pelas propostas dos currículos que raramente incluem o ensino do HPS.

Fonte: Höttecke e Silva (2011)

Como evidenciado por Forato et al. (2011, p.53), estas dificuldades ao tratar sobre aspectos da HFSC no ensino, podem promover uma abordagem histórica problemática, que em geral, origina-se de uma interpretação descontextualizada, equivocada ou mesmo tendenciosa das fontes e/ou de um período histórico. Para os autores, “evitar o uso da pseudo-história, ou mesmo possuir certa fundamentação teórica para problematizá-la, representa, prioritariamente, um compromisso com a formação do aluno”.

Dentre as pesquisas sobre HFSC no ensino de física, compreendo ser fundamental investigar o ensino de temas transversais ao conteúdo científico, como a ética e a responsabilidade social na prática científica, a partir de uma perspectiva voltada para o ensino de fenômenos físicos.

Neste sentido, reconheço o PM como um processo histórico complexo, que viabiliza o tratamento de conteúdos históricos, políticos e científicos, capaz de suscitar a compreensão de aspectos específicos do trabalho científico.

Portanto, com a finalidade de compreender de quais modos aspectos éticos da prática científica têm sido inseridos em manuais escolares de física, propomos realizar uma análise de livros didáticos acerca das discussões sobre a Responsabilidade Social dos Cientistas (RSC), por meio da exposição do episódio histórico conhecido como “Projeto Manhattan”, o qual será apresentado e discutido nas páginas seguintes.

1. UMA BREVE HISTÓRIA SOBRE O PROJETO MANHATTAN

O “Projeto Manhattan”, que deu origem aos armamentos nucleares entre os anos de 1942 e 1945, configura-se como um processo histórico complexo, possibilitado pelo desenvolvimento científico e tecnológico que vinha sendo estimulado devido as condições políticas e econômicas da primeira metade do século XX.

Concordo com Dias (2008, p.89) ao afirmar que, para que a HFSC se configure como um apoio significativo à área de Ensino de Ciências, é necessário ter professores capazes de transpor o conhecimento para diversos níveis de ensino.

Para isso, é fundamental que estes professores conheçam os fatores que produziram as condições de existência do PM, de modo que tais fatores não se configurem apenas como um amontoado de informações, mas como representações de um processo histórico complexo, que foi influenciado e influenciou aspectos de diferentes contextos da vida humana, sejam eles científicos, políticos ou econômicos.

Com intuito de auxiliar no entendimento dos fatores que levaram ao PM, nas páginas seguintes apresento os resultados de uma investigação de caráter historiográfica, na qual busquei compreender como a pesquisa dos fenômenos da Física Nuclear, vinculados a um determinado contexto político e econômico, construíram as bases para que o PM pudesse ocorrer. Para isso, fiz uso tanto de fontes primarias quanto secundárias.

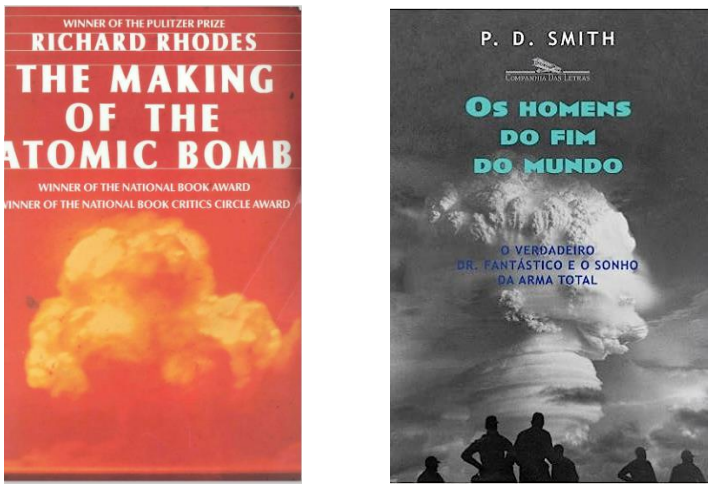
As fontes primarias foram utilizadas majoritariamente para compor os saberes a respeito da física nuclear, afim de compreender o modo como estes saberes foram apresentados e recebidos pela comunidade acadêmica. Também foram consideradas como fontes primarias os manuscritos e relatórios produzidos pelos cientistas que participaram do episódio estudado, estes documentos foram fundamentais para compreender o modo como estes cientistas concebiam suas pesquisas e as possibilidades tecnológicas.

Já as fontes secundarias dizem respeito a outros trabalhos historiográficos que investigaram o PM, publicados como teses, dissertações, livros e artigos científicos. Estes trabalhos foram utilizados com intuito de compreender o contexto histórico ao qual o PM estava inserido, evidenciando

tanto aspectos políticos quanto econômicos, que se mostraram fundamentais para o estabelecimento e manutenção do projeto.

Dentre as fontes secundarias, destaco duas obras que contribuíram significativamente para a composição das informações históricas presentes neste trabalho, sendo elas os livros: "*The Making of the atomic bomb",* escrito por Richard Rhodes em 1986, e o livro "Os Homens do fim do mundo: o verdadeiro Dr. Fantástico e o sonho da arma total", escrito por P. D. Smith e traduzido por José Viegas Filho em 2008, representados abaixo.

Figura 1 – Capa das principais fontes secundárias consultadas



Fonte: autoria própria

Ambos os livros apresentam resultados de investigações a respeito do PM, e a partir de uma ampla bibliografia, possibilitaram o acesso a diversos relatos e fontes primárias fundamentais para a compreensão do momento histórico, além de fornecer interpretações diversificadas a respeito das relações entre o episódio e o contexto social e político da época.

Por fim, cabe destacar que esta pesquisa não possui pretensão de totalidade sobre as informações referentes ao episódio histórico estudado, tampouco trata-se de uma descrição definitiva do mesmo. De acordo com Martins (2010), o papel do historiador da ciência é realizar uma seleção dos fatos que serão analisados e, a partir desta seleção, estabelecer conexões ou influências entre tais fatos. Ainda de acordo com o pesquisador:

> Não é possível uma narrativa histórica totalmente neutra; mas pode-se deixar explícito, para o leitor, que se trata de um resumo de uma

> história mais complexa, e que a seleção e as conexões apresentadas são fruto da mente do historiador. (MARTINS, 2010, p. 7).

Deste modo, exponho a seguir minha interpretação a respeito dos fatos evidenciados pelas fontes consultadas, afim de compreender o modo pelo qual o desenvolvimento da física nuclear e a construção das bombas atômicas relaciona-se com as responsabilidades sociais dos cientistas.

Entendo ainda que esta exposição é fundamental não apenas para justificar a escolha pelo PM, no sentido de evidenciar e avaliar as RSC que serão discutidas no próximo capítulo, mas também para evidenciar o potencial deste contexto histórico para a área de ensino de ciências, tendo em vista a quantidade e relevância das informações científicas e históricas que podem surgir de discussões sobre o episódio.

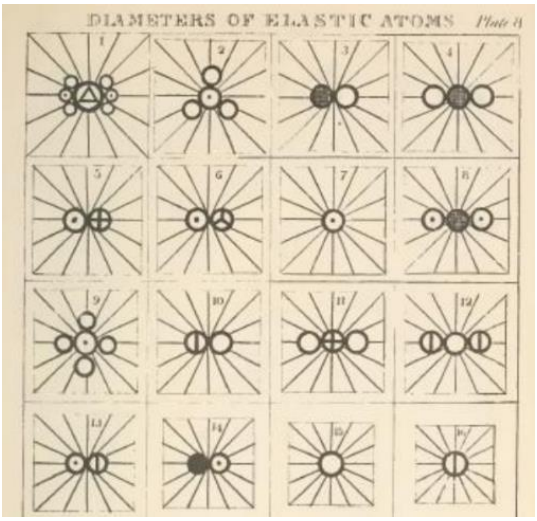
1.1 Caminhos para uma física nuclear: da compreensão do átomo à concepção do núcleo

As reflexões acerca da constituição da matéria se fazem presentes desde a antiguidade, por meio da concepção de que seria formada por pequenos elementos indivisíveis, do grego *"atomes".* Ao longo dos séculos esta ideia foi sendo modificada pela contribuição de diversos cientistas, dentre eles: Aristóteles[2] (384-322 a. C.), Epicuro[3] (95-55 a. C.), Francis Bacon[4] (1561-1626) e Pierre Gassendi[5] (1592-1655) (BIEZUNSKI, 1998, p. 59).

Entretanto, fora John Dalton[6] (1766-1844), ao estudar o caráter corpuscular e as misturas gasosas, entre os anos de 1802 e 1810, quem propôs o primeiro modelo formado por uma esfera maciça permeada por energia (calórico) (MELZER e AIRES, 2015, p. 67).

[2] Filósofo da Grécia Antiga, impactou o pensamento ocidental ao contribuir nas mais diversas disciplinas científicas.
[3] Filósofo grego do período helenístico, fundou o Epicurismo, além de contribuir com o pensamento atomista.
[4] Filosofo e político inglês, foi um dos fundadores do método indutivo de investigação científica e uma das principais personalidades responsáveis pela ciência moderna.
[5] Padre e cientista francês, contribuiu significativamente para a astronomia e rivalizou com as ideias de Descartes.
[6] Cientista britânico responsável por reformular o conhecimento sobre a matéria, ainda foi um dos precursores da Ciência Meteorológica.

Figura 2 – Representações de moléculas feitas por John Dalton



Fonte: Melzer e Aires (2015, p. 66)

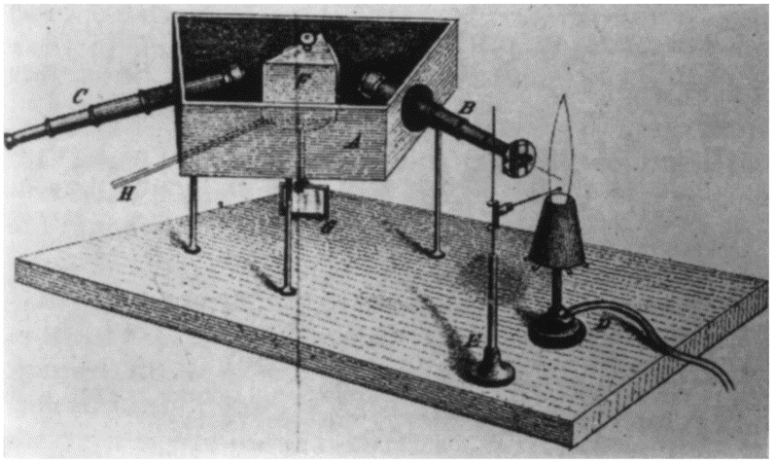
A proposta de Dalton era capaz de sanar dúvidas a respeito do comportamento dos gases, de fenômenos meteorológicos e sobre a composição da atmosfera, além de dialogar diretamente com as pesquisas que versavam sobre a teoria do calórico, tendo por isso alcançado grande influência na comunidade científica da época.

Ainda no século XIX, se destacaram outras pesquisas que tinham como intuito questionar a natureza e a composição da matéria, de modo a evidenciar fenômenos até então desconhecidos ou pouco debatidos, tendo-se destacado a espectroscopia e os estudos sobre os raios catódicos. Estas pesquisas foram bastante influentes para as concepções sobre o átomo e para o surgimento da hipótese nuclear, portanto, nas próximas páginas tratarei sobre o tema, a fim de contextualizar o pensamento que levou à fissão nuclear.

No ano de 1802, a identificação de sete linhas escuras no espectro da luz solar por William Hyde Wollaston[7] (1766-1828) fomentou o interesse por estudos relacionados à decomposição da luz, influenciando Joseph von Fraunhofer[8] (1787-1826), responsável por catalogar outras centenas de linhas escuras (FILGUEIRAS, 1996, p. 22). Logo a seguir, o desenvolvimento do espectroscópio de Bunsen e Kirchhoff, representado pela figura 2, evidenciou novas possibilidades de pesquisa.

7 Químico britânico, conhecido por identificar o Paládio e o Ródio, além de desenvolver uma maneira de processar o minério de platina.
[8] Físico alemão, identificou as linhas escuras de absorção no espectro solar (Espectro de Fraunhofer). Também ficou conhecido por produzir excelentes lentes e vidros ópticos.

Figura 3 – O espectroscópio de Bunsen e Kirchhoff.



Fonte: Filgueiras, (1996, p. 23)

> Esse método ajudava a detectar a presença de substâncias químicas com grande precisão, auxiliando o conhecimento da composição dos materiais terrestres; também permitiu a descoberta de novos elementos químicos. (PIROLO, 2010, p. 20).

Portanto, o período foi também marcado pelas investigações que levaram à identificação de novos elementos, aprofundando o interesse pela constituição do átomo, alguns exemplos são: o césio em 1860 e o rubídio em 1861 por Robert Bunsen[9] (1811-1899), o tálio em 1861 por Sir William Crookes[10] (1832-1919) e o índio em 1863 por Ferdinand Reich[11] (1799-1882).

Já ao fim da década de 1860, a proposta de Mendeleev[12] de organizar os átomos em famílias que compartilhassem certas propriedades previu a existência de outros três elementos, sendo eles o gálio, o escândio e o germânio identificados em 1874, 1879 e 1885, respectivamente (BIEZUNSKI, 1998, p. 69).

Apesar de potencialmente significativa para a compreensão da estrutura atômica, eram “muito frágeis as relações que se construíram entre a estrutura dos átomos e a espectroscopia, principalmente quando eram considerados modelos atômicos ‘estáticos’ como o de Dalton” (LOPES, 2009, p. 15).

[9] Químico alemão, desenvolveu o bico de Bunsen a partir dos queimadores tradicionais da época, ainda, for responsável por identificar o Césio e do Rubídio.
[10] Químico e Físico britânico, conhecido por seus estudos sobre raios catódicos, pelo desenvolvimento de Tubo de Crookes e por identificar o Tálio.
[11] Químico alemão, contribuiu em áreas bastante diversas, entretanto, ficou conhecido por identificar o Índio.
[12] Químico e físico russo, desenvolveu estudos relacionados a periodicidade, propriedades e massas atômicas dos elementos, propondo a tabela periódica no ano de 1869.

Entretanto, a concepção de Dalton viria a ser abalada a partir da constatação de partículas carregadas negativamente.

No ano de 1874, ao estudar as leis da eletrólise propostas por Michael Faraday[13] (1791-1867), George Johnstone Stoney[14] (1826–1911) publicou um artigo intitulado “On the physical units of Nature” no qual propõe a existência de “uma única quantidade definida de eletricidade que é independente dos corpos particulares sobre os quais atua.” (ROBOTTI e PASTORINO, 1998, p. 167). O’Hara (1975, p. 272) aponta que as menções à possível existência de uma partícula carregada, por pesquisadores como Wilhelm Weber, Richard Laming e Hermann L. F. Helmholtz, fez com que as contribuições de Stoney tivessem pouco impacto acadêmico.

Anos mais tarde, em 1891, Stoney retornou ao problema da origem dos espectros, para o qual a existência de “cargas unitárias”, denominadas “elétrons”, possibilitaria novas explicações, uma vez que o movimento interno destas cargas poderia causar ondulações eletromagnéticas no éter e, por consequência, a emissão do espectro (ROBOTTI e PASTORINO, 1998, p. 167).

Hendrik Lorentz[15] (1853-1928) e Joseph Larmor[16] (1857-1924) buscaram, independentemente, investigar as interações entre o éter e a matéria, chegando a propostas bastante semelhantes. Para Larmor, os elétrons deveriam ser constituintes universais da matéria e eram representados como estruturas no éter. Em sua “Teoria do elétron”, Lorentz introduziu dois novos conceitos, o “éter imóvel” e os “íons móveis”, estes íons seriam partículas minúsculas e carregadas, constituintes de toda a matéria, e a partir de oscilações produziriam luz (ROBOTTI e PASTORINO, 1998, p. 164).

Com a luz originada do movimento de partículas carregadas, surgiram hipóteses de que o espectro poderia ser afetado por um campo magnético,

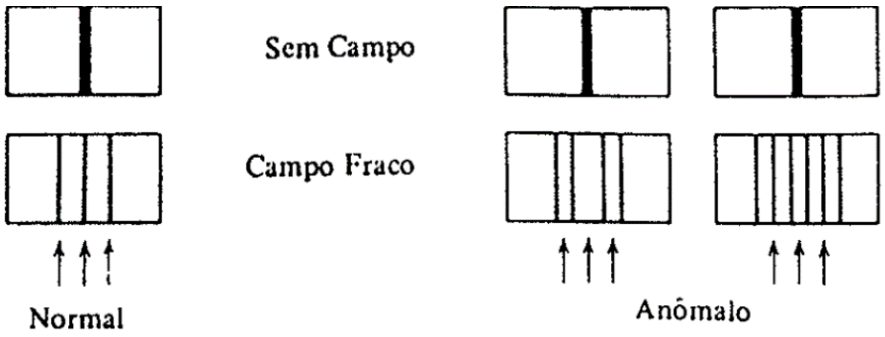
[13] Físico e químico britânico, se destacou nos estudos sobre eletromagnetismo e eletroquímica. Seus trabalhos foram fundamentais para a compreensão da indução eletromagnética e da eletrólise.
[14] Físico Irlandês, se destacou no estudo dos espectros luminosos, tendo sido o precursor na descrição do elétron como partícula subatômica.
[15] Físico neerlandês, teve papel significativo na compreensão das radiações eletromagnéticas, tendo recebido o Prêmio Nobel de física em 1902. Ainda, abriu caminho para a teoria da relatividade.
[16] Físico e matemático irlandês, trabalhou com eletricidade, dinâmica e termodinâmica, foi um dos responsáveis por publicar as Transformadas de Lorentz.

este fenômeno, denominado *Efeito Zeeman*, foi observado por Pieter Zeeman[17] (1865-1943) em 1896. Ao investigar as relações entre magnetismo e luz, de maneira a buscar possíveis alterações causadas pela incidência de um campo magnético ao espectro de um feixe luminoso, Zeeman observou anomalias nas linhas do sódio, e ainda que "o aparecimento e desaparecimento do alargamento era simultâneo com a ativação e desativação do campo magnético", estes efeitos também se faziam presente ao analisar o oxigênio ou lítio (Zeeman, 1897, *apud* Robotti e Pastorino, 1998, p. 163).

Tendo conhecido a Teoria do Elétron de Lorentz, Zeeman apresentou seu experimento como uma evidência da existência de íons e, portanto, a vibração luminosa seria causada pelo movimento destes íons. O cientista também buscou uma primeira aproximação para a relação e/m, tendo alcançado valores próximos aos aceitos nos dias de hoje, entretanto, foi Larmor que ao rever o efeito Zeeman anos seguintes, alcançou maiores informações sobre estas medidas (Ibid., p. 165).

De maneira paralela aos estudos sobre espectroscopia, outros pesquisadores buscaram compreender a natureza do que ficou conhecido como "raios catódicos". Estes raios eram feixes de elétrons (até então desconhecidos) causados por uma diferença de potencial em recipientes contendo gases rarefeitos.

Figura 4 – Representações de chapas fotográficas mostrando as diferentes linhas espectrais no efeito Zeeman



Fonte: Eisberg e Resnick, (1995, p. 463)

[17] Físico neerlandês, responsável por explicar o efeito Zeeman, contribuiu significativamente para a compreensão das radiações eletromagnéticas, recebendo o Prêmio Nobel de física em 1902.

De acordo com Das Neves et al. (2021, p. 1631), ao final do século XIX existiam duas hipóteses a respeito da natureza dos raios catódicos. A primeira apontava que estes raios seriam como a luz, ou então, luz com baixo comprimento de onda, uma vez que tinham uma trajetória retilínea, e poderiam causar fosforescência ou sensibilizar chapas fotográficas. A segunda hipótese apontava que os raios eram formados por partículas negativas movendo-se a altas velocidades, o que explicaria a deflexão causada por campos magnéticos.

No ano de 1895, Jean Baptiste Perrin[18] (1870-1942) desenvolveu um experimento no qual era possível desviar os raios catódicos para dentro de um cilindro metálico ligado a um eletroscópio de lâminas, o qual indicava a presença de cargas negativas quando os raios eram desviados (PERRIN, 1895, *apud* DAS NEVES ET AL., 2021, p. 1633). Este experimento se mostrou crucial no sentido de fortalecer a concepção de que os raios catódicos eram formados por cargas negativas em movimento.

Dois anos depois, Joseph John Thomson[19] (1856-1940) publica seu trabalho intitulado *"Cathode Rays"*, no qual relata o desenvolvimento de uma série de experimentos, com intuito de "testar algumas das consequências da teoria das partículas eletrificadas" (THOMSON, 1897, p. 294), portanto, testar a hipótese de que os raios catódicos eram formados por partículas carregadas. Os experimentos eram destinados ao estudo da carga transportada pelos raios catódicos, a deflexão dos raios por campos eletrostáticos ou magnéticos, a condutividade dos gases e experimentos com eletrodos de diferentes materiais.

Thomson (1897) foi capaz de medir tanto a relação e/m quanto a velocidade destas partículas, a partir de dois procedimentos diferentes (Figura 5), o primeiro com base na variação da temperatura do vidro devido ao choque das partículas, e o segundo a partir da deflexão causada por forças externas, tendo encontrado que as medidas se mantinham iguais independentemente do material analisado. O trabalho ainda refutou o questionamento de Hertz de que a deflexão não poderia ser observada em campos com baixa magnitude,

[18] físico francês, recebeu o Prêmio Nobel em 1926 pelo trabalho na estrutura descontínua da matéria e pela investigação sobre o equilíbrio da sedimentação.
[19] Notório físico britânico, recebeu o Prêmio Nobel em 1906, "em reconhecimento aos grandes méritos de suas investigações teóricas e experimentais sobre a condução da eletricidade por gases". Seus estudos culminaram com a identificação do elétron e a proposição de um novo modelo atômico.

reforçando a hipótese de que os raios catódicos eram partículas carregadas em movimento.

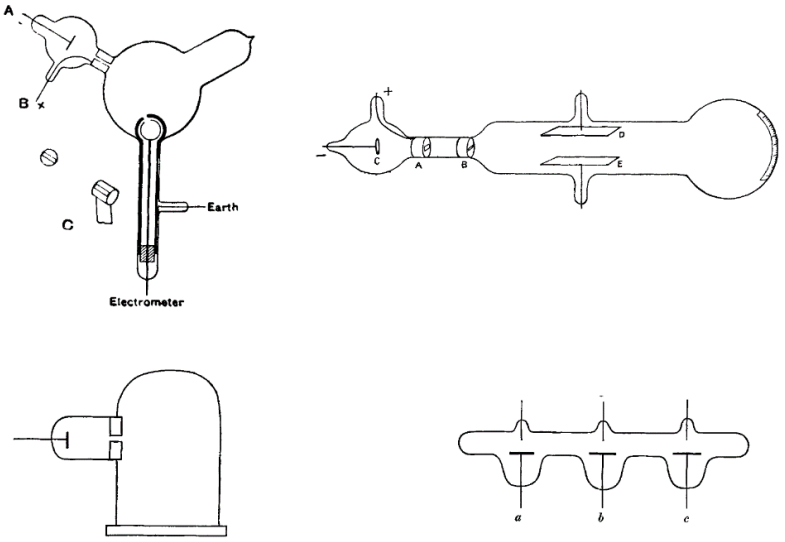
Cabe destacar que Thomson não foi o único a determinar uma medida para a relação *e/m*, embora hoje seja referido como responsável por esta medida. Das Neves et al. (2021) apontam outros pesquisadores que contribuíram com medidas para esta relação, são eles: Franz Arthur Friedrich Schuster[20] (1851-1934), Johann Emil Wiechert[21] (1861-1928) e Walter Kaufmann[22] (1871-1947), tendo os trabalhos reconhecidos pelo próprio Thomson. Esta informação se faz importante no sentido que ressalta o caráter coletivo e complexo do desenvolvimento científico, de maneira a contribuir para a desmistificação da ciência e a não consolidação de uma concepção individualista do trabalho científico.

Thomson se mostrou um pesquisador bastante flexível frente aos referenciais teóricos com os quais trabalhou. Ele havia mostrado interesse em compreender fatores como a periodicidade dos elementos e as ligações moleculares, apresentando outras explicações para a estrutura atômica (LOPES, 2009, p. 26). Após estudar a distribuição dos elétrons por meio de parâmetros como carga e massa, Thomson propõe a seguinte estrutura atômica:

> Temos, em primeiro lugar, uma esfera de carga positiva uniforme, e dentro desta esfera um número de corpúsculos dispostos em uma série de anéis paralelos, o número de corpúsculos varia em cada anel: cada corpúsculo está viajando em alta velocidade em torno da circunferência do anel em que está situado, e os anéis são dispostos de modo que aqueles que contêm um grande número de corpúsculos estejam próximos à superfície da esfera, enquanto aqueles em que há um número menor de corpúsculos estão mais no interior. (THOMSON, 1904, p. 254, tradução minha).

[20] Físico britânico, conhecido por seus trabalhos sobre espectroscopia, raios X, eletroquímica e óptica.
[21] Físico alemão, além de contribuir para a compreensão da estrutura da matéria, foi responsável pela construção do sismógrafo mais antigo ainda em funcionamento.
[22] Físico alemão, comprovou experimentalmente a relação entre massa e velocidade, fundamental para o desenvolvimento da relatividade restrita.

Figura 5 – Representações dos procedimentos experimentais realizados por Thomson em 1897



Fonte: Thomson (1987)

Notamos que, apesar de inserir os elétrons na estrutura atômica, a proposta ainda não foi capaz de elucidar a existência de um núcleo. De acordo com Lopes (2009, p. 42), Thomson chegou a ponderar a possibilidade de um núcleo, entretanto, do ponto de vista da eletrodinâmica convencional, “esses modelos nucleares sempre apresentariam instabilidades”. Destacamos que, além do modelo de Thomson, outros pesquisadores, instigados pela dificuldade teórica de se explicar os fenômenos recém observados, propuseram outras estruturas sem a presença do núcleo atômico, dentre eles: o átomo “ideal” de James Hopwood Jeans[23] (1877-1946), a proposta de Lorde Rayleigh[24] (1842 – 1919) e o modelo do elétron que expande de George Adolphus Schott[25] (1868 – 1937) (MELZER e AIRES, 2015).

Influenciado pela proposta atômica de Dalton, tida como referência para as pesquisas sobre o tema, Thomson apresentou uma teoria de grande impacto, influenciando diversas pesquisas que o sucederam.

> Sua preocupação com o “átomo químico” levou ao aprofundamento das relações entre estrutura da matéria e transformações químicas,

[23] Físico e matemático britânico, primeiro a propor que a matéria é continuamente criada em todo o universo. Seus trabalhos foram fundamentais para o avanço da astronomia.
[24] Matemático e físico inglês, conhecido por usas pesquisas sobre fenômenos ondulatórios, recebeu o Prêmio Nobel em 1904 junto de William Ramsay.
[25] Matemático britânico, é conhecido por desenvolver a teoria da radiação de elétrons viajando a uma velocidade próxima a da luz.

> fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de outras teorias no campo da química, que têm importância teórica, experimental e pedagógica até os dias de hoje, mesmo após o desenvolvimento da química quântica. (LOPES, 2009, p. 45).

Além da evidência de partículas carregadas negativamente, o estudo sobre os raios catódicos gerou também outras linhas de pesquisa que se mostraram fundamentais para a compreensão da constituição da matéria.

No ano de 1895, ao realizar experimentos com tubos de descarga envoltos em cartolina negra, o cientista alemão Wilhelm Conrad Röntgen[26] (1845-1923) observou, pela primeira vez, a existência dos raios X (Figura 6). Não se sabe o que motivou Röntgen a realizar o experimento nas situações descritas (MARTINS, 2012, p. 26), contudo, suas observações geraram um rico momento de investigações, realizadas por diversos grupos de pesquisa, direcionados à compreensão das propriedades, da natureza e das maneiras de produção dos novos raios.

Figura 6 – Primeira radiografia realizada por Röntgen da mão de sua esposa



Fonte: Martins (2012)

As propriedades dos novos raios foram explicadas mediante um longo debate acadêmico, com contribuições significativas de Charles Glover Barkla[27]

[26] Físico e engenheiro mecânico alemão, ficou conhecido por seus trabalhos sobre raios catódicos e por identificar um novo tipo de radiação, os raios X, o que lhe rendeu o primeiro Prêmio Nobel de física, no ano de 1901.

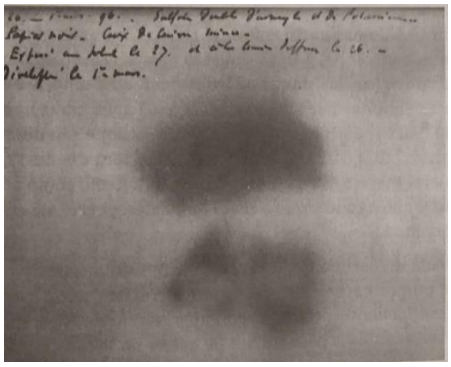
[27] Físico britânico, recebeu o Prêmio Nobel de física em 1917 por investigar a característica radiação Röntgen dos elementos, foi fundamental para a compreensão dos raios X enquanto ondas eletromagnéticas.

(1877-1944) e William Henry Bragg[28] (1862-1942), sendo melhor compreendida pelas observações de Max Von Laue[29] (1879-1960), em 1912, acerca a difração dos raios X (SANTIN FILHO, 1995, p. 578).

O ineditismo das pesquisas e as dúvidas acerca das propriedades dos raios X geraram na academia francesa grande curiosidade a respeito do fenômeno. Ao apresentar os resultados de Röntgen à academia francesa, Henri Poincaré[30] (1854-1912) conjecturou uma possível relação entre a emissão de raios X e a fluorescência do vidro, influenciando diversos trabalhos que negaram esta hipótese (MARTINS, 2012, p. 91).

Dentre os pesquisadores que investigaram a conjectura, destaca-se Antoine-Henri Becquerel[31] (1852-1908), muitas vezes apresentado como responsável por descobrir a radioatividade. O cientista supôs que corpos luminescentes deveriam emitir raios X, entretanto, devido a ausência da luz solar, acabou por relevar chapas fotográficas que estiveram em contato com urânio não irradiado, produzindo as mesmas impressões fotográficas (Figura 7) (MARTINS, 2012, p. 108). A pesquisa experimental que Becquerel desenvolveu em seguida apresentava uma série de erros importantes.

Figura 7 – Representação da chapa fotográfica revelada por Becquerel



Fonte: Martins (2012)

[28] Físico e químico britânico, contribuiu com o avanço da cristalografia de raios X, tendo recebido em o Prêmio Nobel de física em 1915, junto de seu filho William Lawrence Bragg.
[29] Físico alemão, teve grande influência para o desenvolvimento do trabalho científico alemão, foi laureado com o Prêmio Nobel de Física em 1914, por investigar a difração de raios X por cristais. Em 1943 demitiu-se como forma de protestar contra as ideias nazista do partido alemão.
[30] Matemático e físico francês, contribuiu com inúmeras disciplinas científicas, tendo sido considerado o último universalista da matemática.
[31] Físico francês, desenvolveu estudos sobre a fosforescência de alguns materiais, ficou conhecido por acidentalmente perceber a radioatividade do urânio, dividindo o Prêmio Nobel de 1903 com Pierre e Marie Curie.

> Ele [Becquerel] associou à radiação diversas propriedades – tais como reflexão, refração, polarização, aumento por estímulo luminoso – que foram corrigidas por outros pesquisadores, nos anos seguintes. No estudo da radiação do urânio – como também no caso dos raios N – Henri Becquerel mostrou-se um observador descuidado e talvez desonesto, extraviado por suas preconcepções. (MARTINS, 2012, p. 225).

Com o tempo, a comunidade científica foi perdendo o interesse a respeito das radiações do urânio, com os trabalhos de Marie Curie[32] (1867-1934) e Pierre Curie[33] (1859-1906) e, paralelamente, Gerhard Carl Schmidt[34] (1865-1949), sobre a radioatividade do tório, os responsáveis por darem nova notoriedade ao tema, em 1898, dois anos após as primeiras publicações de Becquerel.

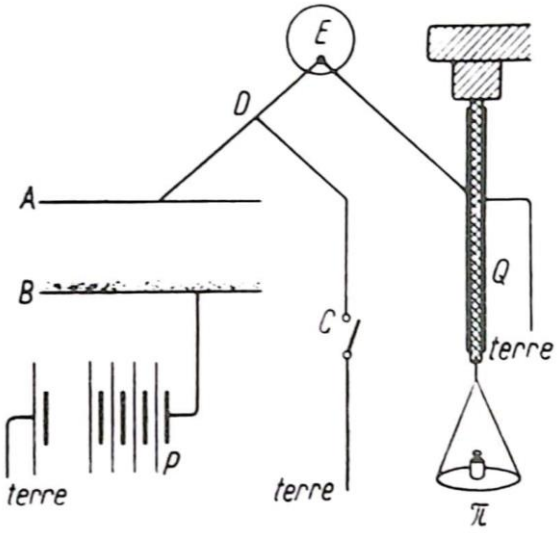
Das concepções que guiaram o trabalho de Marie Curie, Martins (2012, p.272) destaca a importância fundamental da hipótese de que a emissão das radiações ionizantes era uma propriedade atômica, uma vez que possibilitou investigar o fenômeno de maneira a procurar a natureza de sua emissão, diferente das pesquisas apresentadas por Becquerel. Esta hipótese, aliada a um método de pesquisa eficiente (Figura 8) e uma atitude de atenção a anomalias, fez com que logo identificasse dois novo elementos, o polônio e o rádio.

Outro pesquisador que se destacou ao investigar a natureza de materiais radioativos foi o físico Ernest Rutherford[35] (1871-1937). Rutherford já havia se envolvido na compreensão da natureza das radiações desde a apresentação dos resultados de Röntgen, ao publicar, junto a Thomson, um estudo sobre “a condutividade elétrica de gases após terem sido submetidos a

[32] Notória física e química polonesa, contribuiu significativamente para o avanço da radioatividade seus métodos de pesquisa. Além do Nobel em 1903, foi laureada em 1911 com o Prêmio Nobel de química pela identificação dos elementos rádio e polônio, pelo isolamento do rádio e pelo estudo da natureza e compostos deste elemento.
[33] Físico francês, além de suas contribuições junto de Marie para a radioatividade, foi fundamental para as investigações sobre cristalografia, magnetismo e piezeletricidade.
[34] Químico alemão, suas principais contribuições se deram sobre a radioatividade e suas propriedades elétricas.
[35] Notável físico e químico neozelandês, além de suas inúmeras contribuições para a compreensão do fenômeno da radioatividade, Rutherford foi responsável pelos experimentos que originaram as pesquisas sobre a física nuclear. Recebeu, em 1908, o Prêmio Nobel de química "por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas".

raios X” (Martins, 2012, p. 239). Entretanto, o cientista viria a contribuir de maneira ainda mais significativa nos anos seguintes.

Figura 8 – Representação esquemática do equipamento utilizado por Marie Curie para medir a ionização do ar provocada pela radioatividade



Fonte: Segrè (1987)

Em janeiro de 1899, Rutherford publicou na *Philosophical Magazine* um artigo intitulado “*Uranium Radiation and the Electrical Conduction produced by it”,* no qual compara as observações de Becquerel para os raios urânicos para com os resultados de Röntgen para os raios X, com o objetivo de “investigar mais detalhadamente a natureza da radiação do urânio e a condução elétrica produzida” (RUTHERFORD, 1899, p. 110, tradução minha).

Rutherford relata uma série de estudos a respeito dos fenômenos atribuídos aos raios do urânio, usando como procedimento de pesquisa o método elétrico, em detrimento do método fotográfico, fator determinante para seus resultados. Dentre estas investigações, destaca-se a seção “*Complex Nature of Uranium Radiation*”, na qual descreve um experimento que buscou compreender a absorção da radiação por sucessivas camadas finas de metal, encontrando que o aumento da quantidade de camadas diminuiria a absorção. Conclui, portanto, a existência de dois tipos de emissões.

> Esses experimentos mostram que a radiação de urânio é complexa, e que estão presentes pelo menos dois tipos distintos de radiação - uma que é muito facilmente absorvida, que será denominada por conveniência de radiação α, e outra de caráter mais penetrante, que

> será chamada de radiação β. (RUTHERFORD, 1899, p.116, tradução minha).

Ainda no mesmo ano, a natureza corpuscular da radiação beta foi evidenciada simultaneamente na Alemanha e na França, por meio de experimentos que colocaram a radiação sob influência de um campo magnético, de maneira a notar um desvio de mesma direção e ordem de magnitude que os desvios ocasionados nos raios catódicos.

Em janeiro de 1900, Pierre Curie encontrou que a radiação emitida pelo rádio consistia de dois tipos distintos, uma que não sofria desvio aparente e pouco penetrante, e outra mais penetrante e facilmente desviada (JAUNCEY, 1946, p. 233). Devido à necessidade de produzir um campo muitas vezes mais intenso do que os testados até então, o desvio e a carga da radiação puderam ser observados em 1903. (RUTHERFORD, 1903).

Por outro lado, ao utilizar o método fotográfico para investigar as radiações emitidas pelo rádio, Villard[36] (1900) identificou radiações que não poderia ser desviada por placas metálicas ou campos magnéticos e ainda mais penetrantes que as radiações α e β. Portanto, no ano de 1900, a heterogeneidade dos raios urânicos já era conhecida pela comunidade científica, entretanto, existiam muitas dúvidas quanto à natureza dessas radiações e aos fatores que resultaram nas emissões.

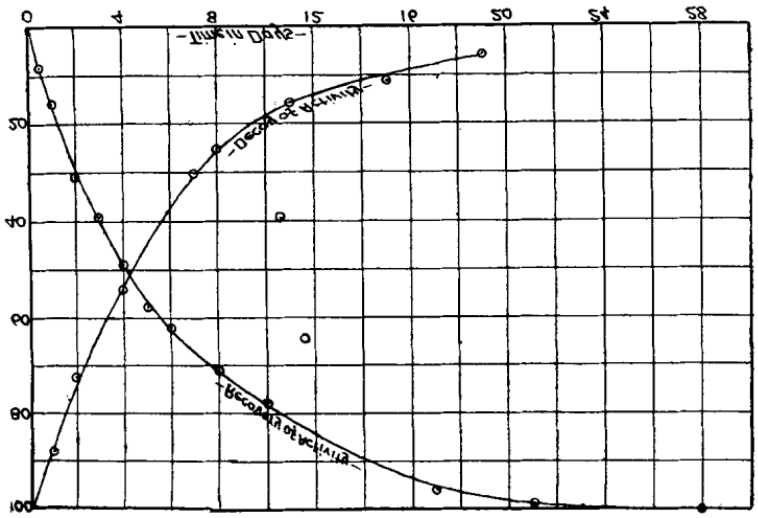
Nos anos seguintes, houve diversos trabalhos voltados para a compreensão dos fenômenos relacionados à radioatividade, tal como os efeitos sentidos por causas externas, a absorção dos diferentes tipos de radiação e a emanação de elementos radioativos. Entretanto, para o propósito deste trabalho de discutir a formação do campo da física nuclear, se faz fundamental evidenciar os estudos sobre as transmutações radioativas.

No ano de 1902, Rutherford, em conjunto de Frederick Soddy[37] (1877-1956), publicou as partes I e II de um trabalho intitulado "*The Cause and Nature of Radioactivity*", que viriam a transformar o pensamento da comunidade científica. Os autores investigaram a radiação do tório, tendo como ponto de

[36] Físico e químico francês, ficou conhecido por identificar os raios gama. Em seguida, dedicou-se ao estudo da dosimetria de radiação, tornando o método muito mais seguro.
[37] Químico inglês, contribuiu significativamente para o estudo da física nuclear como aluno de Rutherford, ainda, foi premiado em 1921 com o Prêmio Nobel de Química por suas contribuições ao sobre as substâncias radioativas e suas investigações sobre a origem e a natureza dos isótopos.

partida o conceito de “emanação” (emissão de um gás com radioatividade temporária). Em um dos experimentos relatados, separaram o nitrato de tório puro da substância ativa produzida, denominada ThX, com intuito de comparar o comportamento da atividade ao longo de um determinado período. Eles encontraram que enquanto a atividade da substância separada diminuía com o tempo, a atividade da substância original aumentaria, de maneira que a soma se mostrava constante no tempo.

Figura 9 – Curva de crescimento e decaimento da atividade



Fonte: Rutherford e Soddy (1902, p. 381)

Estas observações os levaram a propor que grande parte da radioatividade não se originava do tório, mas sim da presença de uma outra substância, em pequena quantidade, que estaria sendo produzida continuamente. Esta e outras observações os fizeram concluir que, durante o decaimento radioativo, ocorreria a transmutação de um elemento a outro. Esta hipótese rompia com a concepção hegemônica de que a radioatividade se tratava de um fenômeno atômico, portanto, para compreender o fenômeno, seria necessário tratá-lo como subatômico, abalando também a concepção vigente de átomo.

> Como, portanto, a radioatividade é ao mesmo tempo um fenômeno atômico e acompanhada de mudanças químicas nas quais novos tipos de matéria são produzidos, essas mudanças devem estar ocorrendo dentro do átomo, e os elementos radioativos devem estar em transformação espontânea. [...] É evidente que estamos lidando com fenômenos fora da esfera das forças atômicas conhecidas. A

> radioatividade pode, portanto, ser considerada como uma manifestação de mudança química subatômica. (RUTHERFORD e SODDY, 1902, p. 395, tradução minha).

Ainda, surgiram três hipóteses que viriam a modificar o pensamento sobre a radioatividade: (i) a radioatividade acompanha a mudança de um átomo para outro, (ii) essas mudanças devem ocorrer dentro do átomo, e (iii) os elementos radioativos devem estar passando por transformações espontâneas, durante as quais as radiações são emitidas (JAUNCEY, 1946, p. 238).

> Durante o período de 1896 a 1904, notamos o surgimento do átomo físico como distinto do átomo químico vago e teórico. No entanto, a prova de que os átomos existem no sentido físico foi obtida à custa da renúncia ao conceito de que os átomos são indestrutíveis e imutáveis. A radioatividade mostrou que certos átomos podem sofrer mudanças espontâneas. (JAUNCEY, 1946, p. 241).

Entretanto, as evidências de propriedades subatômica não foram suficientes para a proposição de um núcleo atômico. É bastante recorrente encontrar, em diversos materiais, que a primeira proposta de um núcleo atômico foi elaborada por Rutherford em 1911, entretanto, destacamos que já no ano de 1903, um físico japonês chamado Hantaro Nagaoka[38] (1865-1950), discutiu a possibilidade de um modelo nuclear.

Nagaoka se mostrou preocupado em apresentar um modelo atômico condizente com as pesquisas recentes nos campos da espectroscopia, dos raios catódicos e da radioatividade, com atenção especial para a influência do campo magnético nos espectros de banda e de linha. Desta maneira, o cientista difere das concepções da academia no sentido de separar as cargas opostas dentro da estrutura atômica. Nagoaka utilizou de cálculos semelhantes aos cálculos de Maxwell para o sistema saturniano, entretanto, para o átomo, a diferença estaria na força de repulsão entre os elétrons que circundam o núcleo. Nagaoka descreve seu sistema da seguinte maneira:

> O sistema, que vou discutir, consiste em um grande número de partículas de igual massa dispostas em um círculo em intervalos angulares iguais e repelindo-se com forças inversamente proporcionais ao quadrado da distância; no centro do círculo, coloque

[38] Físico japonês, ficou conhecido por propor o primeiro modelo atômico planetário, ainda, fora fundamental para a consolidação da física no território japonês.

> uma partícula de massa grande atraindo as outras partículas de acordo com a mesma lei da força. (NAGAOKA, 1904, p. 445, tradução minha).

Apresentou, portanto, diversos cálculos na tentativa de demonstrar a estabilidade de seu modelo, de maneira a entender que “o sistema geralmente permanecerá estável, para pequenas perturbações, desde que a força de atração seja suficientemente grande” (Ibid. 1904, p. 445). Portanto, para que o átomo fosse estável, seria necessário que houvesse uma enorme quantidade de elétrons, podendo chegar a centenas de milhares para os átomos mais pesados, além de o núcleo possuir uma carga muito grande se comparada aos elétrons.

A partir deste modelo, Nagaoka tentou explicar diversos fenômenos, tal como o efeito Zeeman e o número de linhas espectrais. Cabe destacar a explicação de Nagaoka para a radioatividade, que considerava a desintegração do átomo e a natureza das radiações α e β.

> Se o movimento dos anéis adquire uma vibração de grande amplitude produzindo um colapso, os elétrons se dispersam em todas as direções em alta velocidade, e os ‘elétrons positivos’ do centro são ejetados. Considerava que elementos de grande massa atômica, como por exemplo, o Rádio, poderiam perder elétrons mais facilmente e, essa perda poderia causar a desintegração do átomo. No caso, os que saíam no anel formariam os raios β, e as cargas positivas centrais formariam os raios α. (NAGAOKA, 1904, p. 392, *apud,* LOPES, 2009, p. 65).

O modelo não teve grande repercussão na comunidade científica da época, restringindo-se a um longo debate entre Nagaoka e Schott, principal crítico de seu trabalho, “Schott discordava dos cálculos de Nagaoka e também dos valores de carga central e de velocidade angular dos corpúsculos ao redor no anel” (MELZER e AIRES, 2015, p. 71). Nagaoka defendeu grande parte das críticas de Schott ao apontar que seu modelo não era eletricamente neutro, o que garantiria certa estabilidade, entretanto, as defesas ficaram insustentáveis após os apontamentos de Thomson, em 1906, de que o número de elétrons é da mesma ordem que o peso atômico da substância (LOPES, 2009, p. 74).

Durante este período, Rutherford continuava a publicar uma série de artigos voltados à compreensão da radioatividade e a natureza das radiações

emitidas. O cientista demonstrou grande interesse em compreender a absorção dos raios α ao passar pela matéria, a partir de contribuições de William Henry Bragg e seu filho William Lawrence Bragg[39] (1890-1971), que relataram observar desvios na trajetória dos raios β. Porém, Rutherford (1906, p. 144) observou “um leve espalhamento ou deflexão indubitável do caminho da partícula α ao passar pela matéria”. Ainda no mesmo artigo, destacou a pretensão de desenvolver novas pesquisas sobre o tema.

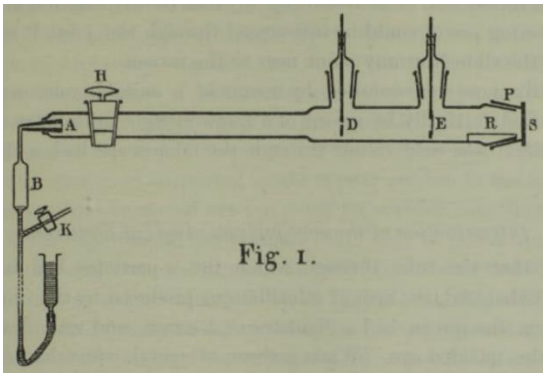
Estes experimentos foram realizados entre os anos de 1908 e 1911, por dois orientandos de Rutherford, o físico Hans Geiger[40] (1882-1945) e o ainda aluno de graduação Ernest Marsden[41] (1889-1970). Os resultados viriam a ser publicados em dois artigos, “On a Diffuse Reflection of the α-Particles” em 1909, e “The Scattering of the α-Particles by Matter” em 1910. Atualmente, estes trabalhos são amplamente abordados como responsáveis pelo experimento que evidenciou a existência do núcleo atômico.

No primeiro artigo, Geiger e Marsden (1909, p. 495, tradução minha) relatam investigar três questões “I) A quantidade relativa de reflexão por diferentes metais; II) A quantidade relativa de reflexão por um metal de espessura variável; e III) A fração das partículas α incidentes que são refletidas”. Os autores relatam que uma pequena fração das partículas α incidentes tem suas direções alteradas de maneira que são refletidas, ainda, que o número de partículas refletidas diminui com o peso atômico.

Já no segundo artigo, Geiger (1910, p. 492) retoma e aprofunda as discussões, possibilitando encontrar um valor médio para os desvios ocasionados por placas finas de metal. Ainda, são apresentados mais detalhes sobre o método utilizado (figura 10), além da justificativa pela escolha do ouro, dado seu coeficiente de espalhamento e facilidade de manuseio.

[39] Físico australiano, além de seus trabalhos sobre cristalografia de raios X com seu pai, Bragg se consolidou ao desenvolver métodos de localização sonora.
[40] Físico alemão, conhecido por seus estudos sobre o núcleo atômico e pela construção de um equipamento capaz de medir a radiação, que futuramente receberia seu nome.
[41] Físico inglês, além de suas pesquisas com Geiger sobre o núcleo atômico, se dedicou ao desenvolvimento da agricultura e do radas.

Figura 10 – Representação esquemática do equipamento utilizado por Geiger



Fonte: Geiger (1910)

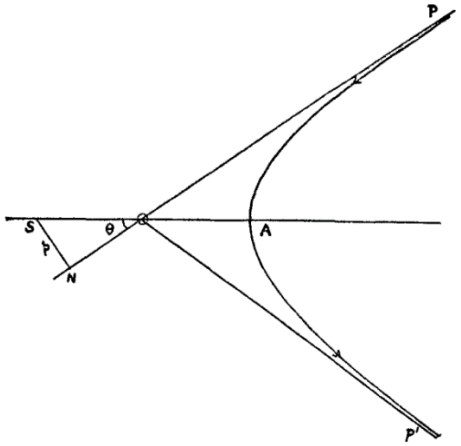
As pesquisas sobre o espalhamento de partículas α se mostraram fundamentais para a proposta de um novo modelo nuclear de átomo, tendo em vista a dificuldade em explicar os fenômenos observados a partir do modelo de Thomson.

Este novo modelo foi apresentado por Rutherford em 1911, que inicia seu trabalho problematizando o modelo atômico proposto por Thomson. O pesquisador desenvolve uma série de cálculos derivados da proposta, com atenção especial à trajetória (Figura 11) e velocidade de uma partícula α desviada por um núcleo. Por fim, Rutherford compara os resultados obtidos com os dados disponíveis na literatura, com intuito de discutir os seguintes pontos:

> (a) A "reflexão difusa" de uma partícula, ou seja, o espalhamento de partículas α através de grandes ângulos (Geiger e Marsden); (b) A variação da reflexão difusa com o peso atômico do radiador (Geiger e Marsden); (c) O espalhamento médio de um feixe de raios α transmitidos através de uma fina placa de metal (Geiger); (d) Os experimentos de Crowther sobre a dispersão de raios β de diferentes velocidades por vários metais. (RUTHERFORD, 1911, p. 680, tradução minha).

Portanto, Rutherford dedicou grande parte de seu trabalho para mostrar que o modelo era condizente com as pesquisas de seus colaboradores. Em seguida, supõe que o átomo consiste em uma carga central, cercada por uma distribuição uniforme de cargas de sinal oposto. Nota-se que ele não aponta a carga central como positiva, alegando que as principais deduções são independentes do sinal estabelecido.

Figura 11 – Trajetória de uma partícula α desviada por um núcleo



Fonte: Rutherford (1911, p. 672)

Apesar de hoje ser tratada como uma mudança de paradigma no pensamento sobre o átomo, à época a proposta de Rutherford, tal como a de Nagaoka, não recebeu aceitação dentro da comunidade científica, reconhecida apenas dois anos mais tarde, a partir das contribuições de Bohr[42]. Lopes (2009, p. 91) destaca dois motivos para a baixa aceitação da proposta: 1) a instabilidade eletrodinâmica do modelo por não considerar a emissão de energia por radiação, e 2) O foco da comunidade científica nas teorias eletrônicas, uma vez que o trabalho se voltou para as partículas α, com pouco espaço para discussões sobre fenômenos elétricos.

Dentre os interesses da comunidade científica europeia, cabe destacar as ideias de Max Karl Ernst Ludwig Planck[43] (1858-1947) que contribuíram significativamente para a compreensão do átomo nuclear. No ano de 1900, Planck publicou um artigo no qual relatava a investigação da radiação eletromagnética emitida por um corpo negro aquecido, com evidências de que o cálculo infinitesimal, apoiado pela concepção de que as relações causais são contínuas, levariam o fenômeno a valores infinitos, portanto irracionais para o fenômeno observado. (PLANCK, 1960, p. 93, *apud* BIEZUSKI, 1998, p. 87).

No sentido de resolver este problema, Planck propôs uma teoria fundamentada na existência de valores discretos para a energia, rompendo com a ideia de que a natureza apresentava valores contínuos, estas

[42] Físico e filósofo dinamarquês, contribuiu significativamente para os estudos sobre a estrutura da matéria e sobre a mecânica quântica. Em 1922 recebeu o Prêmio Nobel de física por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e da radiação.
[43] Físico alemão, é conhecido como um dos físicos mais importantes do século XX por pesquisar sobre a mecânica quântica. Em 1918 recebeu o Prêmio Nobel de física por investigar os quanta de energia.

quantidades elementares foram denominadas quanta, determinadas por uma constante universal que viria a ser conhecida como constante de Planck.

Restringirei a apresentação destes conceitos à introdução da teoria de Planck, uma vez que esta originou uma nova tradição de pesquisa para a comunidade científica da época. Com isso, a menção à teoria tem o objetivo de destacar sua importância fundamental na formulação de um novo modelo atômico condizente a concepções emergentes, que viria a se mostrar fundamental para a consolidação de uma Física Nuclear.

Ainda em 1911 outro modelo atômico foi apresentado por John William Nicholson[44] (1881-1955), em uma série de três artigos, com intuito de desenvolver uma proposta a partir de referenciais da astroquímica, discutindo fatores como a dimensão dos átomos, o peso atômico e a relação entre a distribuição eletrônica e o espectro de raia do átomo (LOPES, 2009, p. 103).

> Na visão desenvolvida neste artigo, a eletricidade positiva existe em unidades de raio muito pequenas comparadas até mesmo com os elétrons, e é a fonte de quase toda a massa do átomo. O sistema giratório é, portanto, planetário, e é digno de nota que Rutherford*, em um artigo recente, concluiu, a partir das evidências fornecidas por experimentos de espalhamento, que o sistema planetário é o mais provável. Mas embora o tamanho das unidades positivas seja tão diferente, a concepção de Thomson da distribuição de volume uniforme é essencial para os cálculos da presente teoria. (NICHOLSON, 1911, p. 865, tradução minha).

Neste modelo os elementos seriam formados pela combinação de quatro substâncias primarias, que consistiam em anéis únicos de elétrons que giram em torno de pequenos núcleos de eletricidade positiva, denominadas *Coronium, Hidrogênio, Nebulium e Protofluorine* compostas de 2, 3, 4 e 5 elétrons, respectivamente (NICHOLSON, 1911, p. 867).

Entretanto, é a partir da adição das ideias de Planck à teoria atômica que o trabalho de Nicholson pôde abalar o paradigma vigente, fundamentado na física convencional, sendo a base para os futuros trabalhos de Bohr. Nicholson (1912, p. 678) apontou que, uma vez que a constante de Planck

[44] Físico e matemático inglês, ficou conhecido por suas contribuições ao átomo de Bohr, ainda, foi responsável por explicar a radiação da linha espectral.

apresentasse significado atômico, o momento angular de um átomo poderia ser modificado em valores discretos a partir da captura e da perda de elétrons.

Por fim, no ano de 1913, o modelo atômico nuclear seria consolidado em uma série de três trabalhos de Niels Henrik David Bohr (1885-1962), nos quais explicou seu modelo a partir do hidrogênio, discutindo com menor profundidade outros elementos mais complexos.

> Os átomos consistem em um núcleo carregado positivamente, cercado por um sistema de elétrons, mantidos juntos por forças atrativas do núcleo; a carga negativa total dos elétrons é igual à carga positiva do núcleo. Além disso, supõe-se que o núcleo represente parte essencial da massa do átomo e que tenha dimensões lineares excessivamente pequenas em comparação com as dimensões lineares de todo o átomo. O número de elétrons em um átomo é deduzido como sendo aproximadamente igual à metade do peso atômico. (BOHR, 1913, p.1, tradução minha).

Diferentemente de Nicholson, Bohr (1913, p. 3) fundamentou-se no modelo de Rutherford, considerando fenômenos distintos, como o calor específico, o efeito foto elétrico, os raios de Röntgen e, principalmente, o espectro de linhas do Hidrogênio, apontando para a "inadequação da eletrodinâmica clássica na descrição do comportamento de sistemas de tamanho atômico". Estes fatores o levaram a introduzir a constante de Planck, como maneira de garantir estabilidade ao modelo.

Por outro lado, Bohr (1913, p. 7) descreve o modelo de Nicholson destacando a validade. Entretanto, aponta que a teoria "não parece ser capaz de explicar as bem conhecidas leis de Balmer e Rydberg". Ainda, os dois cientistas introduziram a constante de Planck por vias distintas, tendo Bohr seguido o caminho pela emissão de energia, enquanto Nicholson se atentou para o momento angular.

Em seguida, apresentou dois pressupostos que balizam a construção do modelo. O primeiro se fundamenta na eletrodinâmica clássica, enquanto o segundo dedica-se à introdução da teria de Planck, o que demonstra o cuidado na formulação da proposta, uma vez que busca tanto elementos da ciência clássica quanto das vertentes emergentes do cálculo.

> (1) Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido por meio da mecânica ordinária, enquanto a

> passagem dos sistemas entre diferentes estados estacionários não pode ser tratada nessa base.
> (2) Que este último processo é seguido pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a frequência e a quantidade de energia emitida é dada pela teoria de Planck. (Bohr, 1913, p.7, *apud* LOPES, 2009, p. 133).

O modelo de Bohr contou ainda com a formulação de cinco postulados, que apontavam para a discussão da teoria quântica em temas como a energia emitida e as órbitas dos elétrons, porém, com o resguardo do caráter clássico durante os estágios de estabilidade. Este trabalho foi fundamental no sentido de unir campos de interesse dos pesquisadores da época, como o estudo dos elétrons e a teoria quântica, de maneira a consolidar a concepção de um átomo nuclear, abrindo caminho para pesquisas que buscariam utilizar a energia armazenada no núcleo.

> Não há dúvida quanto ao impacto causado pela publicação desse artigo sobre o desenvolvimento das teorias atômicas e da constituição das moléculas. É importante registrar que esse impacto foi alto desde o primeiro momento. Imediatamente começaram a ser publicados muitos artigos que discutiam o modelo proposto por ele e também confirmações experimentais de sua teoria. Nos anos seguintes a teoria quântica se ampliou e consolidou com os trabalhos do próprio Bohr e outros como Sommerfeld, Pauli, Goudsmit e Uhlenbeck, Stern e Gerlach. (LOPES, 2009, p. 143).

Me limitarei à apresentação dos modelos atômicos até o de Bohr, uma vez a elucidação da existência do núcleo, atrelado à aceitação por parte da academia, se fez fundamental para as pesquisas que levaram à consolidação do Projeto Manhattan. Entretanto, cabe destacar que a discussão sobre modelos atômicos se aprofundou ao longo dos anos, de certa maneira atrelada aos avanços teóricos da Física quântica, evidenciando as explicações de caráter probabilísticas fundamentadas na equação de Erwin R. J. A. Schrödinger[45] (1887-1961) para a estrutura atômica. Este destaque se faz importante no sentido de apontar que, apesar de fundamental para a pesquisa

[45] Físico austríaco, um dos mais importantes físicos para o desenvolvimento da mecânica quântica. Dividiu, em 1933, o Prêmio Nobel de Física com Paul Dirac, por buscar novas formas produtivas de teoria atômica, associadas a equação que carrega seu nome.

científica, o modelo de Bohr não representa a constituição do átomo atualmente.

Outro movimento importante ocorreu no sentido de olhar para as relações entre massa e energia, evidenciando o potencial energético da matéria, o que elevou o interesse por parte dos cientistas em possibilitar o uso desta energia. Martins (1989) discorre a respeito do tema e evidencia o mal uso da história da ciência no ensino, uma vez que grande notoriedade é dada para a equação de Einstein, em detrimento da apresentação dos desdobramentos das pesquisas em questão, que contaram com contribuições significativas de pesquisadores como Planck e Max von Laue, capazes de generalizar as relações relativísticas de massa e energia para todas as formas de energia.

No ano de 1919, em entrevista ao jornalista Alexander Moszkowski, Einstein foi indagado sobre o uso da energia contida na matéria para fins práticos, tendo como pressuposto que esta energia poderia ser a “panaceia para todos os males humanos”. Sobre este questionamento Einstein respondeu:

> No momento, não há a menor indicação de quando essa energia será obtida, ou se será obtida. Pois isso pressuporia uma desintegração do átomo efetuada por nossa vontade - um estilhaçamento do átomo. E até o momento não há quase nenhum sinal de que isso será possível. Observamos a desintegração atômica apenas onde a própria Natureza a apresenta, como no caso do rádio, cuja atividade depende da contínua decomposição explosiva de seu átomo. (MOSZKOWSKI, 1970, p.24, tradução minha).

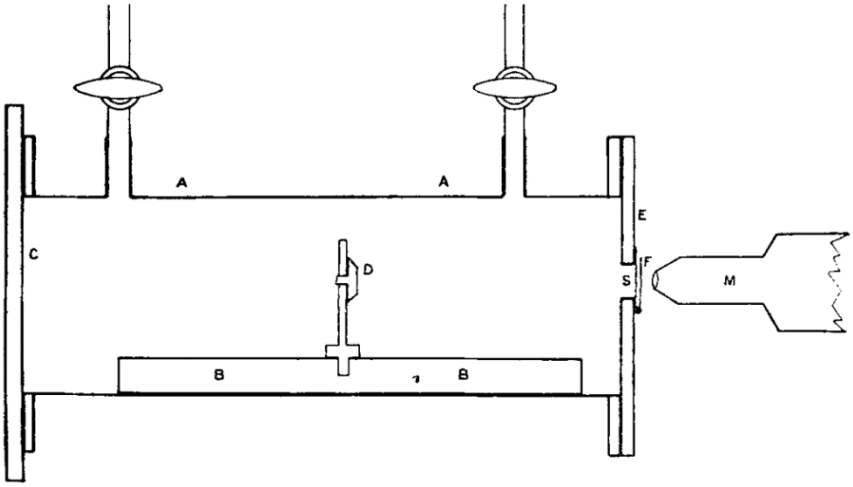
Nota-se o ceticismo de Einstein quanto ao uso intencional desta energia. A crítica por parte do cientista se apresenta pela falta de evidências experimentais da desintegração de átomos, entretanto, no mesmo ano, Rutherford publicaria um trabalho notável, no qual relata possivelmente ter alcançado a desintegração artificial do átomo de nitrogênio.

1.2 Física nuclear: da transmutação artificial à fissão nuclear

Em um trabalho publicado em quatro partes na *Philosophical Magazine*, em junho de 1919, Rutherford buscou continuar as investigações de Charles

Galton Darwin[46] (1887-1962) e Marsden sobre a incidência de partículas α em átomos leves. Para isso, utilizou um aparato experimental (figura 12) no qual uma fonte radioativa D foi posicionada dentro de um tubo evacuado, que poderia ser preenchido por diferentes gases. A uma determinada distância da fonte, foi colocada uma tela de sulfeto de zinco, que cintilava com a presença de hidrogênio, possibilitando a obtenção de medidas pelo pesquisador.

Figura 12 – Arranjo experimental utilizado na transmutação artificial



Fonte: Rutherford (1919, p. 541)

Ao realizar o experimento com ar seco, Rutherford notou um aumento inesperado no número de cintilações, o que indicava que a passagem das partículas α estaria produzindo átomos de hidrogênio. Após investigar diferentes gases, notou que este aumento estaria atrelado à presença de nitrogênio. Uma série de experimentações foram relatadas na sequência, tais como a checagem de hipóteses produzidas no processo ou da influência de efeitos espúrios nos resultados observados. Nota-se grande cuidado em concluir a ocorrência da desintegração artificial do núcleo de nitrogênio, dado a imprevisibilidade e estranheza de tal fenômeno, por fim, Rutherford aponta que:

> Dos resultados obtidos até agora é difícil evitar a conclusão de que os átomos de longo alcance que surgem da colisão de uma partícula α com nitrogênio não são átomos de nitrogênio, mas provavelmente átomos de hidrogênio, ou átomos de massa 2. Se for este o caso, devemos concluir que o átomo de nitrogênio se desintegra sob as

[46] Físico inglês e neto de Charles Darwin, fez importantes contribuições para a mecânica e óptica, ainda foi capaz de calcular as estruturas do átomo de hidrogênio a partir das teorias de Dirac.

> intensas forças desenvolvidas em uma colisão próxima com uma partícula α rápida, e que o átomo de hidrogênio que é liberado forma uma parte constituinte do núcleo de nitrogênio. (RUTHERFORD, 1919, p. 586, tradução minha).

Além de apontar para a transmutação atômica induzida em laboratório, Rutherford (1919, p. 587, tradução minha) indicou a possibilidade de "quebrar a estrutura do núcleo de muitos dos átomos mais leves", desde que estivessem disponíveis partículas α, ou outros projéteis, com uma maior quantidade de energia. Pouco tempo depois, Rutherford e Chadwick (1921, p. 41) encontrariam evidências definitivas de que partículas de longo alcance são liberadas do boro, flúor, sódio, alumínio e fósforo, além do nitrogênio.

Em 1920, ao pronunciar na Conferência Baker, Rutherford teceu comentários importantes quanto a investigações sobre o número atômico, feita por Henry Gwyn Jeffreys Moseley[47] (1887-1915) e quanto ao tema dos isótopos. Destaca-se a primeira referência aos "prótons", tal como especulações a respeito do deutério e de possíveis partículas neutras no núcleo (SEGRÈ, 1987, p. 115). Logo Rutherford (1920) publicaria sua hipótese, apontando que o núcleo é composto pela combinação de cargas positivas e negativas.

Os anos seguintes foram marcados pelo avanço das pesquisas sobre a teoria quântica, consolidando este campo da física dentre a comunidade de cientistas europeus, lançando uma nova geração de pesquisadores que seriam reconhecidos por seus pares e desempenhariam um papel fundamental nas pesquisas dos anos seguintes, dentre eles estavam: Enrico Fermi[48] (1901-1954), George Gamow[49] (1904-1968), Werner Heisenberg[50] (1901-1976),

[47] Físico britânico, encontrou uma relação entre o espectro de raios X de um elemento químico e seu número atômico, tendo revolucionado a busca por novos elementos. Em seguida, se alistou para servir durante a primeira guerra mundial, tendo morrido prematuramente em 1915.
[48] Físico italiano, contribuiu significativamente para o desenvolvimento da teoria quântica, da física nuclear e de partículas, e da mecânica estatística. Foi fundamental para a construção do primeiro reator nuclear, ganhando notoriedade dentre os cientistas participantes do PM. Recebeu em 1938 o Prêmio Nobel de Física por suas demonstrações da existência de novos elementos radioativos produzidos por irradiação de nêutrons e pelas reações nucleares provocadas por nêutrons lentos.
[49] Físico Ucraniano, fez importantes contribuições para a cosmologia, sendo um dos fundadores da teoria do Big Bang. Ainda, contribuiu para o desenvolvimento da mecânica quântica e da física nuclear.
[50] Físico alemão, contribuiu para o desenvolvimento da mecânica quântica, sendo conhecido por desenvolver o principio da incerteza. Em 1932, foi laureado com o prêmio Nobel de física pela criação da mecânica quântica.

dentre vários outros. Portanto, os avanços teóricos da física nuclear estavam, em grande parte, relacionados a aplicações teóricas da Mecânica Quântica.

Em 1932, as evidências experimentais de diversos fenômenos marcaram o retorno da Física Nuclear para o centro das pesquisas em andamento. Neste ano ocorreram diversos avanços importantes, originados de pesquisas sobre o nêutron, o pósitron e o deutério, tal como a primeira desintegração por partícula acelerada artificialmente.

Walter Bothe[51] (1891-1857), em 1930, publicou um artigo no qual relatava o bombardeamento de elementos leves com partículas α, provenientes de uma fonte de polônio, com intuito de investigar a emissão secundária de radiação durante o processo de transmutação nuclear. Eles encontraram uma radiação altamente penetrante, assumindo que as partículas alfas são capturadas pelo núcleo, que libera energia em forma de radiação γ (NESVIZHEVSKY e VILLAIN, 2017, p. 593).

O trabalho de Bothe levantou o interesse de Jean Frédéric Joliot-Curie (1900-1958) e Irène Joliot-Curie[52] (1897-1956), que nos dois anos seguintes, utilizaram da reserva de polônio que dispunham para avaliar a ionização causada pelo bombardeamento de diferentes materiais. Curie e Joliot (1932) encontraram que, ao atingir corpos que contenham hidrogênio, a radiação eletromagnética de alta frequência é capaz de liberar prótons em alta velocidade. Ao buscar explicar o fenômeno por meio do efeito Compton, encontraram dificuldade com a não conservação do momento, ao que atribuíram as incertezas experimentais.

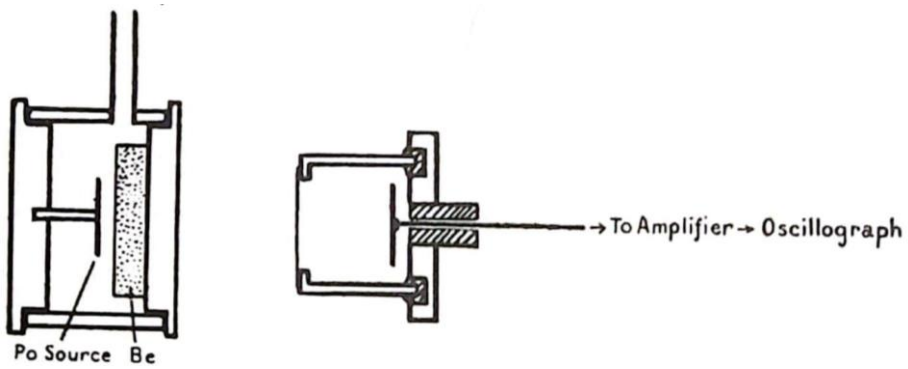
No mês seguinte, James Chadwick[53] (1891-1974) publicou sua hipótese a respeito destes experimentos, denominado “Possible Existence of a Neutron”. Inicialmente, Chadwick (1932a) apontou que é muito difícil de explicar o fenômeno interpretando a emissão do berílio como uma radiação, entretanto, estas dificuldades desapareciam ao assumir que consistiam de partículas de massa 1 e sem carga. Em maio do mesmo ano, Chadwick (1932b) descreveu

[51] Físico alemão, contribuiu com a física nuclear em seus primórdios, ainda, dividiu o Prêmio Nobel de 1954 com Max Born, pelo método de coincidência.
[52] Química francesa e filha de Marie Curie, junto de seu marido fora responsável por perceber a radioatividade artificial, dentre outras contribuições ao estudo da radioatividade e do núcleo atômico. Dividiu com seu marido, em 1935, o Prêmio Nobel de química "em reconhecimento à síntese de novos elementos radioativos"
[53] Físico britânico, concedeu diversas contribuições para a física nuclear, dentre elas a identificação do nêutron, pela qual recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1935.

com maiores detalhes o arranjo experimental e consolidou a existência do nêutron.

Esta descoberta demonstra a importância dos fundamentos teóricos e das hipóteses levantadas pelos pesquisadores durante o processo de construção do conhecimento, de maneira a combater uma concepção de ciência ateórica. Chadwick havia sido incumbido de investigar a existência das partículas neutras no núcleo atômico por Rutherford, levando vários anos para ser capaz de evidenciar e explicar o fenômeno. Segrè (1987, p. 188) aponta que “uma das razões do sucesso de Chadwick foi o fato de ele estar mentalmente preparado para aceitar o conceito de nêutron”.

Figura 13 – Representação esquemática do equipamento utilizado por Chadwick para o estudo do nêutron



Fonte: Segrè (1987)

Este trabalho teve impacto imediato na academia científica, motivando uma mudança na maneira de pensar o núcleo atômico, agora constituído de prótons e nêutrons. Esta proposta foi também apresentada na União Soviética por D. Ivanenko, e na Alemanha por Heisenberg. Esta nova concepção foi importante no sentido de remover grande parte das dificuldades em explicar o confinamento de um elétron em uma região tão pequena do espaço. Apesar de facilitar a compreensão do núcleo, a concepção próton-nêutron desencadearia dúvidas sobre o espectro de emissão do decaimento β, apenas explicado por Fermi em 1934, sendo fundamental para a antecipação teórica da existência do neutrino e das forças nucleares fracas e fortes.

De maneira a dar sequência aos trabalhos recentes, o casal Joliot-Curie publicou uma série de artigos no início de 1934, nos quais apresentavam

resultados inesperados e de grande impacto científico. Joliot e Curie (1934) apontam que, ao irradiar uma folha de alumínio com partículas α, pode ser observado uma emissão de pósitrons que permanecem mesmo após a retirada da fonte, de maneira a decair como um elemento radioativo comum, fenômeno observado também para o boro e o magnésio.

Eles tomaram como hipótese que a interação entre a partícula incidente e o núcleo bombardeado gerariam novos radio-elementos com a emissão de um nêutron. Este novo elemento seria instável e atingiria a estabilidade a partir de decaimento β. Puderam em seguida separar os elementos por meio de métodos químicos, obtendo a primeira prova química de radioatividade artificial.

O impacto na comunidade acadêmica foi imediato, uma vez que as possibilidades de exploração energética e de controle sobre os experimentos com radio-elementos pareciam facilitadas. De acordo com Biezunski (1993, p. 157), ao pronunciar na cerimônia de premiação do Nobel, em 1935, Frédéric Joliot teria apontado para o caráter energético da decomposição atômica, tal como uma possível reação em cadeia que, se capaz de atingir todos os elementos do planeta, poderia desencadear o fim do mundo.

Intrigado pelas investigações do casal, Fermi observou que a eficiência com que as partículas α interagiam com o núcleo se mostrava limitada (cerca de uma desintegração para cada um milhão de partícula α (SEGRÉ, 1987, p. 207). Ainda, observou que não seria possível, a partir da incidência de partículas carregadas, interagir com a maioria dos elementos com número atômico acima de 15. Por outro lado, por não ter carga e, portanto, não sofrer repulsão eletrostática do núcleo, o nêutron, se utilizado como projetil, poderia aumentar as desintegrações a assim interagir com átomos de núcleos mais pesados.

> As fontes de nêutrons disponíveis são, obviamente, muito menos intensas do que as partículas α ou as fontes de prótons. Mas era razoável supor que esse fator seria parcialmente compensado pela maior eficiência dos nêutrons na produção de desintegrações. De fato, o experimento mostrou que mais de quarenta elementos de cerca de sessenta investigados poderiam ser ativados por este método. (FERMI et al., 1934, p. 483).

Nos anos seguintes, ao investigar a radioatividade induzida em uma placa de prata, notaram “que os nêutrons filtrados através da parafina eram muito mais efetivos para produzir reações nucleares do que aqueles que emergiam diretamente de uma fonte” (SEGRÉ, 1987, p. 208), portanto, nêutrons lentos se mostravam mais efetivos que neutros rápidos para produzir algumas reações nucleares.

A partir destes trabalhos, utilizaram nêutrons para avaliar a ativação de uma grande quantidade de elementos. No caso do urânio, os resultados se mostraram estranhos aos esperados, fazendo com que fosse levantada a hipótese de que teria se formado ali um novo elemento, de número atômico superior ao urânio. Iniciaria a partir de então a busca pelos elementos conhecidos como “transurânicos” (FERMI, 1934).

Iniciou-se uma cultura de pesquisa que consistia no bombardeamento de elementos por nêutrons lentos, com o objetivo de identificar novos elementos radioativos. Estas pesquisas eram baseadas em produzir reações nucleares a partir da incidência de feixes de partículas ou núcleos de elementos leves.

Em janeiro de 1939, Otto Hahn[54] e Fritz Strassmann[55] publicaram um artigo no qual relataram ter bombardeado átomos de Urânio com nêutrons, obtendo elementos de menor massa atômica do que o Urânio. Esperava-se um aumento no número atômico do produto das reações, esta diminuição gerou grande surpresa (GILMER, 2011).

> Em consequência dessas pesquisas, precisamos alterar os nomes das substâncias mencionadas em nossos esquemas anteriores de desintegração e chamar aquilo que antes chamávamos de rádio, actínio e tório pelos nomes de bário, lantânio e cério. Como especialistas em química nuclear e próximos dos especialistas em física nuclear, relutamos em tomar tal medida, que contradiz todas as experiências anteriores da física nuclear”. (Hahn e Strassmann, 1939, p.11 *apud* Segré, 1987, p. 210).

[54] Químico alemão, ficou conhecido pela descoberta da fissão nuclear em conjunto a outros pesquisadores igualmente renomados, entretanto, recebeu sozinho o Prêmio Nobel de química em 1944.
[55] Químico alemão, para além da fissão nuclear, contribuiu para a geocronologia ao desenvolver o método rubídio-estrôncio.

No mês seguinte, Meitner[56] e Frisch[57] (1939) formularam uma explicação para o fenômeno observado. Com base nos resultados de Hann e Strassmann, tal como em experiências de Fermi, Bohr e Curie, Meitner e seu sobrinho propuseram que, devido as curtas distancias e as altas energias envolvidas no processo, haveria a possibilidade de ocorrer a quebra do núcleo em duas partes menores, o que chamou de fissão. No mesmo artigo ainda discutiram sobre as series de decaimento dos núcleos, abrindo espaço para discussões teóricas e possíveis buscas por evidências experimentais.

> Parece, portanto, possível que o núcleo de urânio tenha apenas uma pequena estabilidade e possa, após a captura de nêutrons, dividir-se em dois núcleos de tamanho aproximadamente igual (com a proporção de tamanho dependendo de características estruturais mais finas e talvez parcialmente do acaso). (MEITNER e FRISCH, 1939, p. 239, tradução minha).

Logo após as publicações, Frisch observou grandes pulsos produzidos por uma câmara de ionização, seguido de outros grupos de pesquisa europeus, iniciando uma grande quantidade de trabalhos sobre o tema. (SEGRÉ, 1987, p.210).

Frederic Joliot-Curie e seus colaboradores, que já trabalhavam com o bombardeamento de Urânio, apontaram para a possibilidade de ocorrer uma reação em cadeia pela emissão de nêutrons durante o processo. Com a colaboração de Francis Perrin, puderam também compreender que seria necessário inicialmente possuir o que chamaram de massa crítica, que tornaria a reação em cadeia autossustentável.

Caso esta reação ocorresse de maneira descontrolada ocorreria uma violenta explosão. Em caso de manter a reação controlada originaria uma fonte de energia. Contudo, os nêutrons liberados durante o processo de fissão não detinham energia suficiente para fissionar o isótopo U-238, apenas o raro U-235, esta hipótese foi apresentada por Bohr e logo em seguida verificada experimentalmente (SEGRÈ, 1987).

[56] Física austríaca, estudou a radioatividade e teve papel fundamental para a compreensão da fissão nuclear.
[57] Físico austríaco, além de contribuir com Lise Meitner para explicar a fissão nuclear, teve papel central durante o desenvolvimento das bombas atômicas ao projetar o primeiro mecanismo de explosão.

No sentido de pensar a não linearidade do desenvolvimento científico e a relação entre as conclusões de um trabalho frente suas hipóteses iniciais e ao pensamento hegemônico da comunidade científica, cabem dois destaques relacionados aos estudos voltados para a fissão nuclear.

O primeiro deles refere-se à crítica de Ida Noddack[58] (1896-1978), química alemã responsável por identificar o rênio, aos trabalhos de Fermi com o bombardeamento de urânio por nêutrons. A pesquisadora se contrapôs à produção de um novo elemento transurânico nas pesquisas de Fermi, destacando que "quando núcleos pesados são bombardeados com nêutrons, esses núcleos se quebram em vários fragmentos maiores" (NODDACK, 1934, p. 654, tradução minha). Entretanto, a hipótese não obteve impacto no pensamento da época, tanto por confrontar a ideia dominante sobre a produção de novos elementos mais pesados quanto por não receber embasamento experimental por parte da pesquisadora. Ao escrever sobre a descoberta da fissão, Emilio Segrè[59] (1905-1989) faz o seguinte destaque.

> Esse fenômeno já tinha sido sugerido em 1935 por uma especialista em química, Ida Noddack, em nota na qual criticava algumas das nossas experiências em Roma [...]. Esse documento chegou a nosso conhecimento, ao de Hahn e de Meitner, de Curie e Joliot, e supostamente do laboratório Cavendish, bem como de outros centros, mas não fora examinado com a devida cautela. (SEGRÉ, 1987, p. 210).

Outro destaque se refere a reflexões de Leó Szilard[60] (1898-1964), físico húngaro que viria a ser fundamental para a fabricação da bomba atômica. Em 1934, a partir das pesquisas sobre radioatividade artificial e guiado por histórias de ficção científica e pela certeza de que era possível utilizar a energia nuclear em escalas industriais, Szilard teorizou a possibilidade de sustentar uma reação em cadeia uma vez que fosse evidenciado um elemento capaz de emitir dois nêutrons a partir da captura de apenas um.

[58] Química e física alemã, foi a primeira pessoa a supor a fissão nuclear. Anos mais tarde identificou o Rênio, tendo sido indicada a receber o Prêmio Nobel por três vezes.
[59] Físico italiano, contribuiu em grande escala para a física nuclear. Em 1959, dividiu o Prêmio Nobel de física com Owen Chamberlain, por identificar o antipróton.
[60] Físico húngaro, uma das principais personalidades no decorrer do PM, tanto por suas contribuições científicas (estudos da fissão nuclear controlada) quanto por suas concepções políticas.

Szilard não fora capaz de gerar grande entusiasmo nos pesquisadores ao seu entorno sobre esta possibilidade, porém, submeteu uma patente na qual cita termos como a reação em cadeia e a massa crítica necessária para uma reação autossustentável. As hipóteses não correspondiam ao que conhecemos hoje como fissão nuclear, devido aos desvios nas medidas do peso atômico no berílio. Entretanto, a dificuldade em encontrar financiamento para seu projeto impossibilitou a continuação das investigações.

> Na primavera de 1934, solicitei uma patente que descrevia as leis que regem essa reação em cadeia. Esta foi a primeira vez, eu acho, que o conceito de massa crítica foi desenvolvido e que uma reação em cadeia foi seriamente discutida. (SZILARD, 1978, p. 18, tradução minha).

É interessante notar que diversos grupos de pesquisa passaram perto de evidenciar a fissão nuclear, entretanto, guiados pela hipótese da produção de elementos transurânicos, não foram capazes de assimilar os resultados do bombardeamento de Urânio por nêutron. É notório as oscilações do pensamento científico, tal como a presença de erros que problematizam a visão de uma ciência acumulativa e exata.

Dessa maneira, as bases da física estavam colocadas para a exploração da energia nuclear. Ainda, com a ascensão de governos autoritários e a escalada de conflitos entre potências europeias, a ciência, que já havia sido amplamente aplicada para fins militares durante a primeira guerra, passou a ser pensada como uma forma de acelerar a vitória devido ao seu alto poder de destruição.

1.3 O Projeto Manhattan

Além dos desenvolvimentos teóricos relatados acima, outro fator fundamental para viabilizar a realização de um empreendimento científico como o Projeto Manhattan foi a concentração de cientistas com grande experiência em Física Nuclear em países como Estados Unidos e Inglaterra.

A partir da segunda década do século XX, a ascensão do fascismo na Itália e do nazismo na Alemanha modificou a dinâmica da produção científica em toda a Europa, uma vez que a livre troca de conhecimento com grupos de

pesquisa nestes países havia sido dificultada pelos regimes. Com a promulgação das leis raciais e o início da perseguição de minorias étnicas, muitos cientistas se viram obrigados a emigrar.

> Em pouquíssimo tempo, portanto, o cabedal científico americano foi incalculavelmente enriquecido por cientistas do porte de Enrico Fermi, Hans Bethe, Emilio Segrè, Otto Stern, Leo Szilard, Edward Teller, James Franck, John Von Neumann, Eugene Wigner, Felix Bloch, Victor Weisskopf, Samuel Goudsmit e outros, quase todos laureados com o Prêmio Nobel. (CARVALHO, 2015, p. 200).

Até 1939, com o início da guerra cada vez mais evidente, outros cientistas fundamentais para a Física Nuclear sairiam da Alemanha, como Lise Meitner, Otto Frisch e Rudolf Peierls[61]. Dentre estes cabe destacar o caso de Meitner, que de acordo com Segrè, (1987, p. 210) "Após o *Anschluss*, ela viu-se diante de um risco mortal. Fugiu da Alemanha para a Holanda, com o auxílio de amigos alemães, e dali seguiu para a Suécia, onde recebeu asilo". Foi neste período conturbado que a pesquisadora avaliou os trabalhos de Hann e foi capaz de explicar a fissão nuclear.

O movimento dos cientistas europeus devido ao contexto social e político da década de 30 fez com que a ciência norte americana e britânica se desenvolvesse rapidamente, o que em condições normais, necessitaria de grandes investimentos na formação de novos pesquisadores e décadas para a composição de um quadro semelhante (CARVALHO, 2015).

Neste cenário, o rápido desenvolvimento teórico da fissão nuclear suscitou discussões, em diferentes países, sobre a possibilidade de uma bomba capaz de liberar a energia do núcleo atômico.

Na Alemanha, o físico e químico Paul Harteck[62] (1902-1985) escreveu para o Ministro da Guerra sobre a possibilidade de fabricar um armamento muitas vezes mais poderoso do que os convencionais, seguido da publicação de um artigo, escrito por Siegfried Flügge[63] (1912-1997), que discutia as aplicações práticas da energia nuclear. De acordo com Smith (2008, p. 286)

[61] Físico britânico, trabalhou com temas diversos como a física nuclear, a supercondutividade e a superfluidez. Destacou-se por seus trabalhos dedicados à fabricação de armamentos nucleares.
[62] Físico e Químico alemão, foi um dos principais cientistas alemães dedicados ao projeto da bomba atômica, chegou a ter avanços ao utilizar a água pesada como moderador para o processo de fissão nuclear.
[63] Físico alemão, estudou a estrutura de estrelas e contribuiu com a teoria quântica fundamental.

estes movimentos mostravam que os alemães seguiam ruma a bomba atômica.

Em março de 1939, ocorre a ocupação da Tchecoslováquia pelo governo alemão, resultando na suspensão das exportações de minério de Urânio, amplamente minerados na região (CARVALHO, 2015). O governo alemão inicia seus empreendimentos, atribuindo ao Instituto Keiser Wilhelm de Física pesquisas com fins militares. O conhecido físico Werner Heisenberg assume a diretoria do instituto, dando origem a um período controverso de sua carreira, marcado pelo encontro com seu antigo professor Niels Bohr, em 1941.

Nos EUA, Szilard em conjunto de seus compatriotas Edward Teller[64] (1908-2003) e Eugene Wigner[65] (1902-1995), tentaram esconder a possibilidade de produzir um armamento nuclear, entretanto, com a divulgação do fenômeno da fissão nuclear por Otto Hahn e a ocupação da Tchecoslováquia, pediram a Albert Einstein que, por sua influência, assinasse uma carta endereçada ao presidente em exercício dos EUA, atentando para a possibilidade de produção de armamentos nucleares e recomendando maiores preocupações com o tema.

Na carta, considerando os trabalhos de Joliot, Fermi e Szilard, Einstein solicita que o governo mantenha proximidade com os avanços da Física Nuclear, de maneira a dar condições materiais por meio do aumento do financiamento, com intuito de acelerar o trabalho experimental (EINSTEIN, 1939).

A partir destas recomendações, estabeleceu-se o Comitê do Urânio, grupo formado por cientistas e militares, responsáveis por estudar as aplicações militares da energia nuclear, entretanto, até o ano de 1941, não houveram avanços para o estabelecimento de um centro de pesquisa direcionado a aplicações militares da energia nuclear. Neste sentido, Smith (2008, p. 295) entende que a articulação entre os dois grupos foi dificultada devido ao ceticismo dos militares em relação a bomba atômica, e também pela resistência em alocar uma grande quantidade de recursos para este objetivo.

[64] Físico húngaro, naturalizado estadunidense, fez diversas contribuições para a física nuclear, espectroscopia e a física de superfície. Ainda, foi um dos principais cientistas na busca pela bomba atômica durante o PM. Após a guerra, investiu na pesquisa bélica, sendo conhecido atualmente como o pai da bomba de hidrogênio.

[65] Físico húngaro, conhecido por diversas contribuições para a física nuclear e para as partículas elementares, por este motivo, foi laureado em 1964 com o Prêmio Nobel de física.

Na Inglaterra, país que mais avançou no projeto dentre os anos de 1939 a 1941, observaram-se esforços tanto por cientistas quanto por militares e governantes, os quais buscavam promover discussões e condições para as pesquisas da área.

Como dito anteriormente, após a compreensão do fenômeno da reação em cadeia, um dos maiores impedimentos para a construção da bomba se dava ao fato de que, para que fosse possível uma reação em cadeia autossustentável a partir do Urânio, acreditava-se ser necessário separar uma grande quantidade de Urânio-235. Portanto, tanto a quantidade de material necessário quanto as dificuldades técnicas para a separação do isótopo faziam crer que não seria possível produzir qualquer tipo de aplicação prática dentro de poucos anos.

Otto Frisch (1904-1979) e Rudolf Peierls (1907-1995), que trabalhavam na universidade de Birmingham, se voltaram ao problema em 1940, resultando na publicação do memorando composto de duas partes, na qual discutiam dentre outros fatores: formas de isolar U-235, massa crítica e as consequências radioativas da explosão.

Frisch e Peierls (1940) apontaram que aproximadamente 1 kg de U-235 poderia ser suficiente para construção da bomba, este valor mostrava a possibilidade de o empreendimento ser realizado dentro de poucos anos. Destacaram que deveriam ser montadas duas esferas com massa inferior à massa crítica, separadas por um mecanismo que possibilitaria uma união rápida entre as partes, que em contato com a radiação cósmica daria início à explosão. Como forma de separar o U-235, eles propuseram o método de difusão térmica, ainda que nada impedisse a melhora da técnica ou o desenvolvimento de meios mais eficientes.

> Um composto de urânio gasoso, por exemplo hexafluoreto de urânio, é colocado entre duas superfícies verticais que são mantidas a uma temperatura diferente. O isótopo tende a ficar mais concentrado perto da superfície quente, onde é levado para cima pela corrente de convecção. A troca com a corrente movendo-se para baixo ao longo da superfície fria produz um efeito de fracionamento e, após algum tempo, um estado de equilíbrio é alcançado quando o gás próximo à extremidade superior contém marcadamente mais isótopo leve do que próximo à extremidade inferior. (FRISCH e PEIERLS, 1940).

Apesar de apontar para uma tecnologia capaz de destruir cidades e subjugar possíveis inimigos, os destaques sobre os efeitos radioativos após as explosões suscitaram discussões morais a respeito de sua aplicabilidade. De acordo com os cientistas, os rejeitos poderiam ser carregados pelo vento e pela chuva, portanto, se tratava de uma ameaça impossível de ser defendida ou controlada, e seu uso causaria a morte inevitável de muitos civis, por este motivo, alegaram que “isso pode tornar o seu uso inadequado, como arma, por este país” (FRISCH e PEIERLS, 1940, p. 145). Após a publicação deste documento, foi formado um subcomitê de cientistas responsáveis por investigar a viabilidade da bomba.

Com a identificação do Netúnio, não tardou para ser levantada a possibilidade de que, ao ser bombardeado com nêutrons, seria possível produzir um elemento de número atômico ainda maior, denominado plutônio, que aparentava ser um combustível ideal para a bomba devido à facilidade em sofrer fissão nuclear.

Pouco tempo depois, em artigo escrito em 1941 e publicado anos mais tarde, Kennedy et al. (1946) evidenciou as propriedades do plutônio, discutindo a possibilidade de usar este material como combustível para armamentos nucleares. Esta possibilidade recebeu confirmação teórica também por um instituto de pesquisa alemão (CARVALHO, 2015). Portanto, em 1941, existiam duas possibilidades para a fabricação de uma bomba nuclear, porém ambas apresentavam entraves tecnológicos.

A viabilidade do Urânio dependia de isolar isótopos do elemento, produzindo assim Urânio mais físsil que o encontrado na natureza, porém tal processo era incerto e arriscado. Para a utilização de Plutônio, era necessário produzir quantidade suficiente do material, o que poderia ser feito por meio de reatores nucleares, sendo necessário encontrar um bom moderador a ser utilizado no processo de fissão.

Em agosto de 1941, Churchill aprovou a proposta de desenvolvimento da bomba. Por outro lado, nos EUA os assuntos nucleares ainda eram tratados com pouca prioridade, sendo necessário que Mark Oliphant[66] (1901-2000) fosse ao país discutir as possibilidades teóricas com Vannevar Bush e James

[66] Físico australiano, responsável em grande parte pelo estabelecimento do PM, o cientista contribuiu para a primeira demonstração da fissão nuclear, além de identificar os núcleos de hélio-3 e trítio.

Conant, ambas figuras importantes para a supervisão e mobilização de cientistas americanos para fins militares (SMITH, 2008, p. 298).

Para além das motivações políticas e econômicas relacionadas ao controle das tecnologias nucleares, como mencionado acima, o temor quanto a notícia de que os nazistas se aproximavam da produção de uma bomba atômica, fez com que o então presidente inglês, Winston Churchill, comunicasse ao governo norte-americano sobre a necessidade de maiores investimentos no setor nuclear.

Até o ano de 1941, a possibilidade de produção de um armamento nuclear não havia sido prioridade para os norte-americanos. Com a entrada dos EUA na guerra, foi feito um acordo de cooperação para as pesquisas nucleares, em que os ingleses ficariam responsáveis pela pesquisa de moderadores para a fissão, enquanto os norte-americanos estabeleceriam instalações para a produção de combustíveis físseis (CARVALHO, 2015).

Era consenso de que, para que a bomba pudesse de fato ser construída, era necessário desenvolver inicialmente um reator nuclear, ou seja, produzir uma reação em cadeia autossustentável capaz de fornecer energia e, desta maneira, produzir quantidades significativas de material físsil.

> No interior do que seria, essencialmente, um reator, a chuva de nêutrons liberados pela fissão do urânio transmutaria o urânio-238 no elemento novo, o plutônio. Com esse elemento os cientistas esperavam produzir bombas atômicas sem ter de recorrer ao difícil processo de separar o urânio-235 do urânio-238. (SMITH, 2008, p. 302).

Existiam, a princípio, duas hipóteses para o empreendimento de uma reação em cadeia autossustentável. A primeira delas, defendida por Bohr e seus colaboradores, era a de que somente seria possível atingir a estabilidade a partir do raro isótopo U-235. Por outro lado, Fermi defendia que seria possível utilizar o U-238, isótopo comum do urânio, mas para isso propôs que, diferente do grupo de Joliot que havia utilizado uma mistura homogênea de Urânio em água, fosse confeccionado uma estrutura heterogênea, na qual o Urânio estaria disposto em blocos, o que reduziria a influência do Hidrogênio na captura de nêutrons (SALVETTI, 2004, p. 185).

A partir dos esforços de Szilard em adquirir óxido de Urânio, foi possível realizar um experimento em maior escala destinado ao estudo da absorção de nêutrons secundários. Deste modo, Anderson, Fermi e Szilard (1939) encontraram que o urânio natural seria capaz de emitir 1.2 nêutrons por nêutron absorvido, podendo chegar a 1.5. Concluíram, portanto, que a reação em cadeia poderia ser mantida, desde que mais nêutrons fossem produzidos pelo urânio do que absorvidos pelo composto de urânio e hidrogênio. Portanto, a concentração de hidrogênio na água tornava duvidosa sua utilização como moderadora do processo. A fim de superar esta dificuldade, tanto Szilard quanto Fermi propuseram que fosse utilizado o grafite como moderador de nêutrons.

> Fermi pensou em grossas camadas de grafite alternadas com camadas de urânio, Szilard pensou no que provaria a solução vencedora, uma estrutura com pequenos blocos de urânio imersos em tijolos de grafite. Essa estrutura, por analogia com os cristais, foi chamada de rede de grafite em U. (SALVETTI, 2004, p. 188, tradução minha).

Ao final de 1941, foram realizadas duas tentativas de construir uma pilha atômica a partir da composição de grafite e Urânio. A primeira atingiu um fator multiplicador (número de nêutrons emitidos por nêutrons absorvidos) igual a 0.87, ou seja, 13% abaixo do mínimo necessário. Para a segunda tentativa, Fermi desumidificou os componentes da pilha e a revestiu com coberturas de chapa de aço, visando remover o hidrogênio e diminuir a evasão de nêutrons, desta maneira obteve um fator igual a 0.918. (SALVETTI, 2004, p. 195).

Smith (2008, p. 295) destaca uma das contribuições mais importantes de Szilard, “a informação dada por ele de que era essencial remover o Boro que normalmente está presente no grafite”. Dada a alta capacidade de o elemento Boro absorver nêutrons, a impureza do grafite dificultava a reação, mais tarde, percebeu-se que este foi um dos principais fatores que levaram ao fracasso da Alemanha nazista em construir um reator nuclear.

Com a entrada definitiva dos EUA na segunda guerra mundial e o acordo de cooperação com os ingleses em dezembro de 1941, houve um aumento significativo nos investimentos para as pesquisas cientificas que objetivavam a construção de um reator nuclear. No mesmo mês, é emitido um

comunicado oficial ao comitê do Urânio sobre a prioridade e organização dos trabalhos.

> Conant disse-lhes que Harold Urey continuaria com o seu promissor trabalho sobre a separação de isótopos em Columbia, enquanto Lawrence trabalharia na separação eletromagnética em Berkeley. Em Chicago, Arthur Holly Compton prosseguiria com os estudos teóricos e com o projeto da bomba propriamente dita. Ele deverá também investigar o novo elemento, o plutônio, e o seu possível uso em uma bomba. (SMITH, 2008, p. 299).

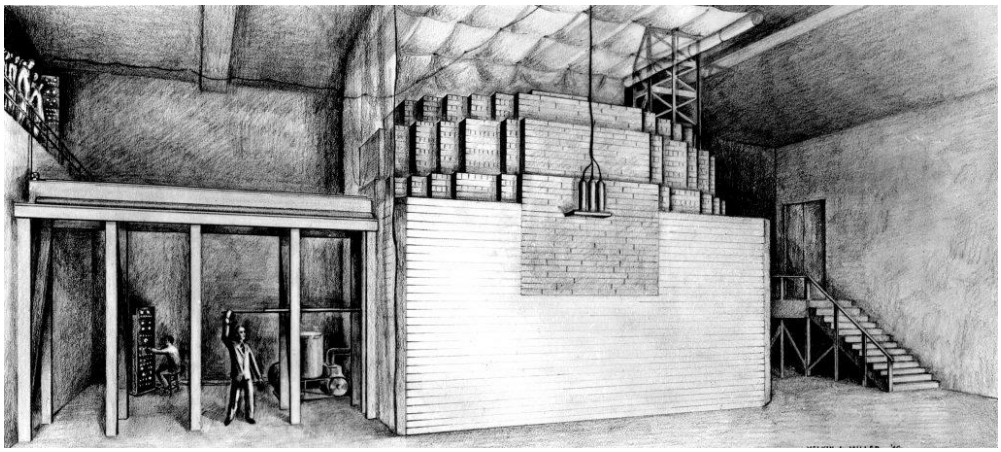
Compton, que ficara responsável pelos estudos teóricos acerca dos reatores nucleares, havia traçado um plano estratégico, convencendo uma grande quantidade de cientistas a concentrarem seus trabalhos na Universidade de Chicago, a qual se tornaria o principal centro de pesquisas sobre a viabilidade e produção de Plutônio.

Portanto, depois de um ano de pesquisas, em dezembro de 1942, a primeira reação em cadeia autossustentável foi produzida, com a participação de diversos cientistas e colaboradores e a um grande investimento por parte do governo estadunidense. O feito ocorreu por meio de um reator construído a base de grafite puro e urânio metálico (escolhido em detrimento do oxido de Urânio), que funcionou por 28 minutos, alcançando um fator de 1,0006 e potência de meio watt (SALVETTI, 2004, p. 202).

A partir da escalada dos empreendimentos, em 17 de setembro de 1942, o projeto passou a ser comandado pelo exército, tendo como representante o general Leslie Groves, responsável por chefiar as atividades. Segrè (1987) aponta diversos físicos notáveis envolvidos no projeto, dentre eles: Fermi, encarregado da produção de plutônio, Ernest Lawrence[67] (1901-1958), responsável pela separação do isótopo de Urânio, e Robert Oppenheimer[68] (1904-1967), diretor científico do projeto, responsável pelas etapas de construção da bomba e por coordenar a dinâmica da produção de conhecimento.

[67] Físico americano, ficou conhecido por seu trabalho na separação de isótopos do urânio para o PM. Em 1939 recebeu o Prêmio Nobel de Física pela invenção e desenvolvimento do cíclotron.
[68] Físico estadunidense, foi responsável por dirigir o PM para a fabricação das bombas. Ao longo de sua vida, mostrou bastante interesse por temas políticos, tendo contribuído para a elucidação do papel político do cientista.

Figura 14 – Desenho do primeiro reator nuclear construído, denominado Chicago Pile 1



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

Com a maior atuação do estado americano por meio das forças oficiais e militares, houve um aumento significativo da capacidade produtiva e dos investimentos financeiros. Por outro lado, as práticas militares de compartimentalizar as pesquisas e tornar confidencial todo tipo de informação relevante, que eram estranhas à pesquisa em física nuclear até então, também foram estabelecidas por ordem de Groves.

Os cientistas estavam proibidos de publicar resultados em periódicos de ampla circulação, estes deveriam ser relatados diretamente aos representantes militares responsáveis pelo PM. Estas medidas eram justificadas como uma maneira de evitar o vazamento de informações. Contudo, tal prática causava estranhamento em parte dos cientistas que, por vezes, necessitavam de maior agilidade na troca de informações, concentra-se na figura de Szilard diversas reclamações ao regime, que o tornaram suspeito aos olhos de Groves (SMITH, 2008, p. 306).

O PM contava com quatro sedes principais, eram elas: o Met Lab, em Chicago, voltado para o estudo do plutônio; Oak Ridge, no Tenesse, onde o Urânio-235 era separado de seu isótopo natural; Hanford, em Washington, onde ocorria o processo industrial de produção de combustíveis físseis e; Los Alamos, onde as bombas eram projetadas e fabricadas (SMITH, 2008, p. 333).

Em abril de 1943, a compartimentalização das pesquisas fazia com que os departamentos não conhecessem a totalidade do conhecimento produzido, o que agravava algumas dificuldades. Neste sentido, Oppenheimer pediu para

que Robert Serber[69] (1909-1997) escrevesse um documento que seria utilizado para informar os integrantes do projeto sobre os avanços realizados (RHODES, 1986, p. 460).

O documento foi escrito em cinco cartas, nas quais apresentavam o objetivo do projeto, alguns avanços realizados e as principais dificuldades remanescentes. Os temas discutidos variaram desde elementos teóricos como o processo de fissão nuclear até elementos de caráter mais técnico, como a segurança do Urânio natural e os métodos de detonação[70].

É notório a preocupação em como seria realizada detonação do artefato, uma vez que havia grande receio de que a bomba detonasse antes de atingir a massa crítica, o que ficou conhecido como pré-detonação. Para pensar o problema, Serber apresentou as principais maneiras consideradas até então. Nas palavras do cientista “Esta é a parte do trabalho sobre a qual menos sabemos até o momento” (SERBER, 1943, p. 21, tradução minha). A figura X mostra algumas das possibilidades levantadas. Por fim, conclui com os seguintes direcionamentos.

> Vemos que o programa experimental imediato está amplamente preocupado com a medição das propriedades de vários materiais e com o problema da munição. Também é necessário iniciar agora estudos sobre técnicas de determinação experimental direta de tamanho crítico e escala de tempo, trabalhando com grandes, mas subcríticas quantidades de material ativo. (SERBER, 1943, p. 24, tradução minha).

Figura 15 – Mecanismos para detonação da bomba



Fonte: Serber (1943)

[69] Físico estadunidense, conhecido por sua participação no PM ao ministrar palestras para os demais cientistas, foi também responsável por resolver o problema da hidrodinâmica na montagem das bombas.
[70] Destaca-se a possibilidade de utilizar este documento em sala, uma vez que se constitui como uma fonte primária rica em elementos teóricos relacionados à Física Nuclear.

Dois projetos de detonação se mostraram promissores, um para o Urânio e outro para o Plutônio. O primeiro consistia em disparar uma pequena quantidade de Urânio contra uma massa subcrítica, atingindo a criticalidade necessária. Para o Plutônio, por se tratar de um material mais físsil, era necessário maior velocidade em atingir a massa crítica para que não ocorresse a pré-detonação, para isso, foi desenvolvido um mecanismo de implosão que comprimiria várias partes de material físsil em um núcleo com grande força, a partir de ondas de choque (SMITH, 2008, p. 336).

O nível de inovação técnica da bomba de Plutônio fez com que fosse necessário testá-la antes de um possível bombardeio, uma vez que a falha da explosão poderia entregar anos de pesquisas à nação inimiga. Por outro lado, a confiança quanto aos métodos utilizados para a bomba de Urânio dispensava a necessidade de um teste de detonação.

A fim de avaliar o equipamento e colocar à prova os anos de pesquisa e os investimentos destinados a este objetivo, ocorreu, no dia 16 de julho de 1945 a detonação da primeira bomba nuclear, em uma região denominada “Jornada del Muerto”, no Novo México. No dia do teste, diversos cientistas que participaram do projeto estavam presentes, mas também havia representantes políticos e militares, uma vez que o sucesso da explosão teria impacto direto na política global.

Inicialmente, ocorreu um trabalho de preparação que movimentou uma grande quantidade de técnicos, engenheiros e pesquisadores, a fim de garantir condições próximas à ideais para a realização do teste. No local, uma base foi construída com diversas medidas de segurança, além de ruas pavimentadas e as estruturas necessárias para suspender a bomba, chamada de “Gadget”, que além de lhe conceder um nome, dizia respeito também a sua natureza enquanto artefato nuclear.

Diversos problemas aumentaram as tensões a respeito do teste, destacam-se duas experiências. Edward C. Creutz[71] (1913-2009) havia realizado um ensaio, sem material radioativo, para avaliar o dispositivo de

[71] Físico americano que participou do PM, antes disso, auxiliou na construção do cíclotron e desenvolveu pesquisas sobre o bombardeamento de nêutrons utilizando o grafite como moderador.

detonação, o que apresentou falhas. No mesmo dia, Donald Hornig[72] (1920-2013) avaliou a unidade de disparo, também resultando em fracasso. Ambos os testes vinham apresentando resultados positivos nos dias anteriores, Hans Bethe avaliou que os fracassos se deram pelo desgaste dos instrumentos, o que não influenciaria na Gadget, uma vez que não seria o mesmo equipamento utilizado (ATOMIC HERITAGE FOUNDATION, 2014).

Figura 16 – Acampamento Base construído para o teste Trinity



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

No meio científico havia outro temor, debatido inicialmente em um encontro de físicos em Berkeley, organizado por Oppenheimer em 1942, o de que a fissão do Urânio pudesse desencadear a fissão de elementos comuns na natureza, como Hidrogênio e Nitrogênio, incendiando a atmosfera e colocando fim à vida na Terra. Entretanto, este pensamento estava restrito a poucos cientistas que ainda não se viam convencidos.

> Nunca havia ocorrido um experimento de física similar ao de Trinity. A bomba foi içada ao topo de uma torre de madeira de trinta metros de altura, no local que seria conhecido como o marco zero original. Uma série de barreiras de concreto reforçado alojava câmeras e instrumentos científicos, de sismógrafos a câmaras de ionização, que registrariam todos os aspectos da explosão. Os dados seriam transmitidos por cabos pesados, com uma extensão total de cerca de oitocentos quilômetros. O aparato consistia de uma esfera de um metro e meio que continha cargas de potentes explosivos com formas

[72] Químico americano e especialista em explosivos, chefiou a unidade de pesquisa sobre o mecanismo de disparo para a bomba de implosão de plutônio.

> especiais à volta de um núcleo de plutônio que não era maior que uma bola de tênis (SMITH, 2008, p. 336).

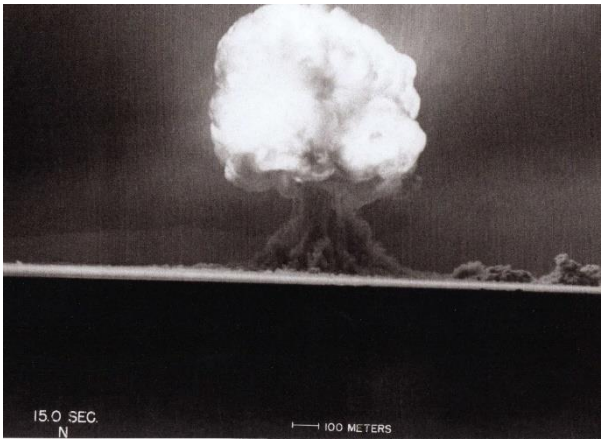
Figura 17 – Norris Bradbury com a bomba “Gadget” no topo da torre



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

Com os preparativos prontos e uma condição climática favorável, “às 5:29:45, Gadget detonou com entre 15 e 20 quilotons[73] de força” (ATOMIC HERITAGE FOUNDATION, 2014). Hoje é possível encontrar uma grande variedade de descrições dos eventos após a explosão, nas quais os sujeitos narram os fatos a partir da posição a qual ocupavam e das crenças que mantinham.

Figura 18 – Teste Trinity, 15 segundos após a detonação



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

[73] Unidade de medida para energia que mede o equivalente em TNT, usualmente utilizada para medir explosões nucleares. A quantia de 1 quiloton refere-se a energia liberada pela explosão de 1 tonelada de TNT, equivalente a $4{,}184\times10^{12}$ Joules.

Rhodes (1986, p. 672) apresenta descrições de Isidor Rabi[74] (1898-1988), Teller, Joseph McKibben[75] (1912-2001), Lawrence, Bethe, Serber, Segrè, Joseph W. Kennedy[76] (1916-1957), Edwin McMillan[77] (1907-1991), George Kistiakowsky[78] (1900-1982), Victor Weisskopf[79] (1908-2002) e Oppenheimer. Todas as descrições se referem a uma luz bastante intensa, muitas vezes comparada com a luz solar, também ao aumento da temperatura, mesmo que a quilômetros de distância da explosão.

Como observado ao longo deste capítulo, os cientistas se mostraram cientes dos efeitos destrutivos de uma bomba atômica, entretanto, além das descrições sobre os efeitos da explosão, nota-se também um certo espanto e horror no relato destes cientistas, que argumentaram esperar uma explosão de intensidade várias vezes menor.

Laura Fermi (1954, p. 239, tradução minha) aponta que seu marido "não percebeu o tremendo barulho, descrito por outras testemunhas como 'um poderoso trovão'", uma vez que se via preocupado com um experimento que havia preparado para aquele momento. Fermi soltou pequenos pedaços de papel que foram arrastados pelas ondas de choque, em seguida, contou os passos da distância percorrida para calcular então a energia liberada. Hoje sabemos que a bomba foi ainda mais eficiente do que os cálculos de Fermi.

Thomas F. Farrell (1891-1967), general de brigada e segundo na hierarquia militar, presente no teste Trinity, escreveu ao Departamento da:

> Toda a região ficou iluminada por uma luz de intensidade muitas vezes maior do que o sol do meio-dia. Era dourado, roxo, violeta, cinza e azul. Iluminava cada pico, fenda e cume da cordilheira próxima com uma clareza e beleza que não podem ser descritas... Trinta segundos após a explosão veio a rajada de ar, pressionando com força as pessoas e as coisas; em seguida, quase imediatamente,

[74] Físico estadunidense, além de trabalhar no PM, desenvolveu diversos estudos sobre radares, ainda, recebeu o Prêmio Nobel de física de 1944 "por seu método de ressonância para registrar as propriedades magnéticas de núcleos atômicos".
[75] Físico e engenheiro americano, antes de ingressar no PM, realizou pesquisas sobre aceleradores eletrostáticos. Foi o cientista responsável por acionar o explosivo para o teste Trinity.
[76] Químico estadunidense, conhecido por participar da identificação do plutônio.
[77] Físico estadunidense, foi o primeiro a identificar um elemento transurânico, o netúnio, de modo a receber o Prêmio Nobel de química em 1951, em parceria com Glenn Theodore Seaborg.
[78] Físico e químico ucraniano, contribuiu significativamente para o dispositivo de implosão da bomba de plutônio.
[79] Físico estadunidense, foi líder de grupo de pesquisa durante o PM, entretanto, com o fim da guerra, se dedicou para a não proliferação de armas nucleares.

> um forte trovão, longo e assustador, que alertou para o dia do juízo final... (FERMI, 1954, p. 239, tradução minha).

Após a explosão, cientistas foram levados em veículos blindados para que fosse feita a avaliação dos danos causados. Laurence (1947) descreve a depressão causada no local da explosão, com extensão circular de aproximadamente 350 metros de raio, e profundidade que variava de 7,5 a 3 metros.

Figura 19 – O local do teste após a explosão da “Gadget”



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

> Um exame subsequente do solo revelou que toda a vida, tanto vegetal quanto animal, foi destruída em um raio de cerca de uma milha. Não havia uma cascavel na região, nem uma folha de grama. A areia dentro de um raio de quatrocentos metros foi transformada em uma substância vítrea da cor de jade verde. Uma torre de cordame de aço pesando trinta e duas toneladas, a uma distância de oitocentos metros, foi transformada em uma massa retorcida de destroços. A torre em Zero foi completamente vaporizada. Uma manada de antílopes que pastava a vários quilômetros de distância havia desaparecido completamente (LAURENCE, 1947, p. 195).

Ao longo do projeto, diversos cientistas pensaram estar trabalhando na construção de uma arma definitiva, que colocaria fim a todas as guerras, uma vez que deixaria de fazer sentido, se resumindo a um ato de destruição mútua. Entretanto, após observar a explosão da *Gadjet*, notaram que “embora a bomba atômica fosse um instrumento definitivo de destruição, ela também encerrava a possibilidade de criar uma paz duradoura” (SMITH, 2008, p. 344).

Com o término da guerra, Oppenheimer descreve o sentimento destes cientistas da seguinte maneira:

> Quando explodiu, na madrugada do Novo México, aquela primeira bomba atômica, pensamos em Alfred Nobel, e sua esperança, sua vã esperança, de que a dinamite poria fim às guerras. Pensamos na lenda de Prometeu, naquele profundo sentimento de culpa nos novos poderes do homem, que reflete seu reconhecimento do mal e seu longo conhecimento dele. Sabíamos que era um mundo novo, mas ainda mais sabíamos que a própria novidade era uma coisa muito antiga na vida humana, que todos os nossos caminhos estão enraizados nela (Oppenheimer, 1946, apud, Rhodes 1988, p. 676).

O teste Trinity encerrou o Projeto Manhattan, constatando a eficácia do método de implosão desenhado para as bombas de Plutônio, de maneira a dar respaldo às autoridades políticas e militares quanto aos anos de investimentos no projeto. Nascia a era atômica, dando início a uma nova geração de armamentos e uma maneira diferente de fazer guerra.

Carvalho (2015) aponta que o PM, ao longo de seu desenvolvimento, contou com mais de 120 mil pessoas e um orçamento próximo de 26 bilhões de dólares em cotação atual, enquanto o projeto alemão contou com algumas centenas de pessoas, e um orçamento limitado próximo de 2,5 bilhões de dólares em cotação atual.

De acordo com Smith (2008, p. 310), a falta de prioridade dos alemães para a produção de artefatos nucleares devia-se ao fato de Hitler se mostrar cético quanto as possibilidades da energia atômica, priorizando os recursos para as pesquisas e produção de mísseis V-2, desenvolvidas por Wernher Von Braun[80]. Ainda, alerta que:

> O projeto alemão da bomba atômica, afetado desde o início por rivalidades internas, nunca chegou perto de criar uma arma que pudesse ser empregada. [...] Eles nunca souberam, por exemplo, que o grafite puro podia ser usado em um reator (algo que Szilard entendeu no início da guerra) e estavam convencidos de que a massa crítica necessária para a bomba media-se em toneladas, e não em quilos. (SMITH, 2008, p. 293).

[80] Engenheiro e cientista alemão e uma das principais figuras no desenvolvimento do foguete V-2 na Alemanha Nazista e, posteriormente, do foguete Saturno V nos Estados Unidos.

Hoje compreende-se que não haveria qualquer possibilidade material de a Alemanha nazista ter construído uma ogiva nuclear a tempo de ser utilizada na guerra, devido a insuficiência dos recursos destinados para este fim. Este fato demonstra a influência das condições econômicas e políticas sob a prática científica e as questões éticas deste trabalho, de modo que tais questões se relacionam diretamente ao contexto histórico, que lhes fornecem condições concretas de realização.

1.4 As consequências do Projeto Manhattan para a Física e para a sociedade

Alguns meses antes do teste Trinity, em maio de 1945, a Alemanha havia se rendido dando fim à guerra na Europa, a partir de então, os conflitos se concentraram no pacífico a fim de neutralizar as forças japonesas. Com intuito de discutir as medidas que seriam aplicadas pelos países vencedores, foram realizadas três conferências que marcaram a história da geopolítica, com representação dos chefes de estado das principais potências globais da época (Estados Unidos, União Soviética e Inglaterra).

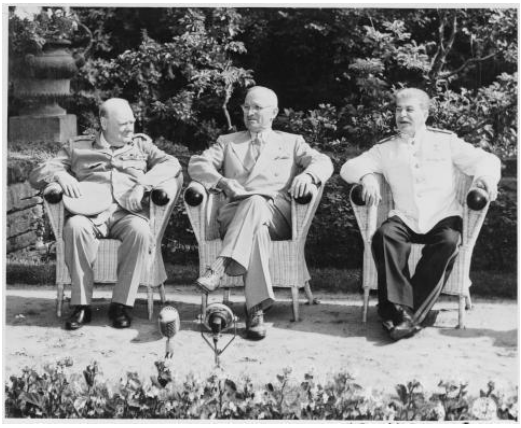
A conferência de Yalta, realizada em fevereiro de 1945, marcou o ápice da colaboração entre EUA e URSS. Como apontam Vasconcellos e Mansani, (2013, p. 46), foi em Yalta onde se “iniciaram as tratativas para o reordenamento geopolítico do imediato pós-guerra”, ainda, ficou acordada a entrada da URSS na Guerra da Manchúria contra os Japoneses dentro de alguns meses, em troca da manutenção de sua influência em países fronteiriços.

Em julho e agosto do mesmo ano foi realizada a conferência de Potsdam, nos arredores de Berlim, com a prioridade de discutir as próximas medidas a serem tomadas em relação à Alemanha. Entretanto, o clima político foi impactado por conflitos de interesses entre os líderes presentes.

> O fator de maior relevância no início da Conferência de Potsdam foi, sem dúvida, o anúncio feito por Truman à Stalin sobre o sucesso do Projeto Manhattan [...] Este fator foi determinante no condicionamento de toda a Conferência. (VASCONCELLOS E MANSANI, 2013, p. 47).

Neste contexto, além da divisão do território da Alemanha, os representantes dos EUA, China e Reino Unido apresentaram a Declaração de Potsdam, que versava sobre os termos para a rendição japonesa, obrigando a desmilitarização do país e a rendição incondicional de todo o poderio militar (POTSDAM DECLARATION, 1945). Nota-se que o verdadeiro potencial das bombas não foi mencionado, mas, referido de maneira resumida como uma "destruição imediata e total". Os japoneses rejeitaram a proposta.

Figura 20 – Líderes da Inglaterra (Winston Churchill), EUA (Harry S. Truman) e União Soviética (Josef Stalin) durante a Reunião de Potsdam



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

Paralelamente aos trâmites geopolíticos, nos EUA, os responsáveis pelo Projeto Manhattan se organizavam para avaliar a utilização das bombas, neste sentido foram formados dois comitês consultivos.

O primeiro deles ficou conhecido como *Interim Committee* e tinha como objetivo avaliar o controle sobre as tecnologias nucleares e a propaganda no pós guerra, e ainda, aconselhar para a prática deste controle (NORRIS, 2002, p. 658). No dia 1 de julho o comitê relatou as seguintes recomendações quanto ao uso da bomba:

> O Sr. Byrnes recomendou, e o Comitê concordou, que o Secretário de Guerra deveria ser informado de que, embora reconhecendo que a seleção final do alvo era essencialmente uma decisão militar, a visão atual do Comitê era que a bomba deveria ser usada contra o Japão o mais breve possível; que seja usado em uma planta de guerra cercado por casas de trabalhadores; e que seja utilizado sem aviso prévio. (STIMSON et al., 1945).

Em seguida, os cientistas que aconselhavam o comitê apresentaram suas recomendações finais, reconhecendo a “obrigação para com a nação de usar as armas para ajudar a salvar vidas americanas na guerra japonesa”. Ainda, o relatório indicava a necessidade de relatar às demais potências sobre os progressos, com intuito de atingir a cooperação internacional.

No que diz respeito ao lançamento das bombas, apontavam que as opiniões no campo científico não eram unânimes, iam “desde a proposta de uma demonstração puramente técnica até a aplicação militar mais bem desenhada para induzir a rendição”. Entretanto, o grupo se colocou a favor da utilização, por não ser capaz de “propor nenhuma demonstração técnica capaz de pôr fim à guerra”. (OPPENHEIMER, 1945).

O segundo comitê, denominado *Target Committee,* tinha como objetivo qualificar cidades japonesas, a partir de uma perspectiva científico-militar, como alvos desejáveis para as demonstrações nucleares. Os cientistas tiveram papel significativo na decisão, uma vez que apresentaram estudos de efetividade de destruição, levando em consideração aspectos como a dimensão do impacto, os fatores psicológicos e os efeitos radiológicos (RHODES, 1986, p. 630). Ao fim do processo, foram selecionadas quatro cidades japonesas: Hiroshima, Kokura, Nigata e Kioto.

Discussões sobre se a bomba deveria ou não ser lançada se faziam pouco presentes frente ao avanço dos trâmites em favor sua utilização. Smith (2008, p. 350) indica que, diferente da maioria dos cientistas, nunca foi objetivo dos militares utilizar as armas nucleares contra a Alemanha nazista, uma vez que a falha poderia entregar anos de pesquisa, mas que “o propósito real da bomba atômica era alvejar o Japão de modo a intimidar os soviéticos”.

Além de intimidar a União Soviética pela espetacularização da catástrofe nuclear, era interessante para o governo norte americano que os japoneses se rendessem antes da entrada definitiva dos soviéticos no conflito, de maneira que a ocupação do território não fosse repartida, tal como havia ocorrido com a Alemanha (MOURÃO, 2005).

Com a recusa japonesa pela rendição incondicional, no dia 6 de agosto de 1945 a primeira bomba atômica, denominado *Little Boy,* explodiu a 580 metros acima da cidade de Hiroshima. Os impactos demonstraram os horrores

de uma explosão nuclear, tanto pelo calor quanto pela pressão e pela contaminação radioativa.

> Ao explodir, a bomba atômica criou uma bola de fogo com uma temperatura inicial de vários milhões de graus centígrados e uma pressão de várias centenas de milhares de bares. No solo, no ponto imediatamente abaixo da bola de fogo – conhecido como hipocentro – a pressão 'foi estimada entre 4,5 e 6,7 toneladas por metro quadrado. Em uma fração de segundo a temperatura no solo subiu para algo entre 3 e 4 mil graus centígrados. Nenhum elemento, inclusive o carbono, permanece sólido a 4 mil graus centígrados (SMITH, 2008, p. 358).

Figura 21 – Bomba de urânio *Little Boy,* pronta para ser levada ao avião



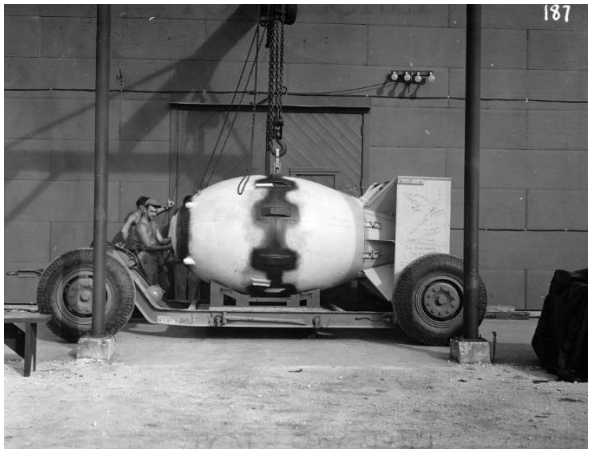
Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

De acordo com Okuno (2015, p. 212), "A chuva negra [...] contaminou uma área ovalada de 11 km por 19 km", esta contaminação gerou graves problemas ambientais, além de efeitos tardios, como o aumento na incidência de leucemia ao longo dos anos. Os primeiros sintomas sentidos pela incidência da radiação consistiam em vômito de sangue e perda de apetite, entretanto, com o tempo a doença se agravava causando diarreia, manchas pelo corpo, perda de cabelo, sangramento no nariz e febre (SMITH, 2008, p.360).

Relatos de sobreviventes e de pessoas que visitaram o local após a explosão, ilustram a capacidade destrutiva da bomba. Ao apresentar alguns destes relatos, Nakagawa (2015) aponta que morreram aproximadamente 140 mil pessoas.

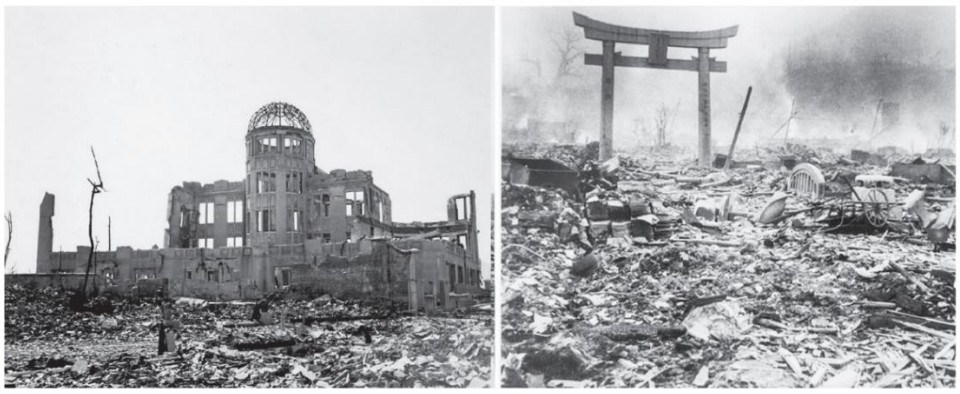
Três dias após Hiroshima, em 9 de agosto, a segunda bomba explodiu sob a cidade de Nagasaki, escolhida como alvo secundário após a constatação de mal tempo na cidade de Kokura. Diferente da primeira, que alcançou força equivalente a 12,5 kilotons, esta era feita a base de Plutônio e seu mecanismo de implosão de mostrou ainda mais eficaz, tendo alcançado 22 kilotons (SMITH, 2008, p. 361).

Figura 22 – Bomba de plutônio *Fat Man* em transporte



Fonte: Atomic Heritage Foundation (2014)

Figura 23 – Hiroshima (à esquerda) e Nagasaki (à direita) após as explosões



Fonte: Okuno (2015)

Após os bombardeios, em 15 de agosto de 1945, o imperador do Japão anuncia a rendição do país, assinada no dia 2 de setembro (MOURÃO, 2005).

A dinâmica de produção cientifica fabricada no interior do Projeto Manhattan intensificou-se durante os anos seguintes, sendo fundamental para o desenvolvimento tecnológico no período pós-guerra.

> Os cientistas do Projeto Manhattan haviam dado o seu passe de mágica fatal e a guerra havia sido ganha. Mas o preço da paz, a partir de então, seria pago pelos habitantes de todas as cidades do mundo, que teriam de conviver com o 'puro terror' sofrido pelos cidadãos de Hiroshima e Nagasaki (SMITH, 2008, p. 365).

No cenário geopolítico, estes acontecimentos levaram à formulação de uma nova ordem, agravada pela realização de testes nucleares por outras nações (União Soviética, Inglaterra, França, etc.). Assim, o sonho de alguns cientistas de fabricar uma arma definitiva que daria fim às guerras, devido seu alto poder destrutivo, deu lugar a uma corrida armamentista que aprofundou a lógica científico-militar.

Tendo em vista a escalada dos conflitos políticos e econômicos entre EUA e União soviética, principais potencias econômicas e militares da época, as décadas seguintes ficaram marcadas por um desenvolvimento tecnológico acelerado, que levou a expansão dos arsenais nucleares, ao desenvolvimento da bomba de hidrogênio e a realização de diversos testes nucleares, de dimensões cada vez maiores. O período, devido ao sentimento de horror frente a uma ameaça de guerra nuclear, ficou conhecido como Guerra Fria.

O avanço destas tecnologias, alinhada à eminente ameaça de confronto entre as potências, gerou o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP), estabelecido em 1968 e vigente desde 1970. O tratado se mostrou bastante controverso, por estabelecer "Estados nuclearmente armados" e "Estados não-nuclearmente armados", considerado discriminatório em diversos países. Além de buscar cessar a corrida armamentista, também estabelecia fatores como: políticas de desarmamento dos estados nuclearmente armados e acesso livre a aplicações pacíficas da tecnologia nuclear aos estados signatários (FELICIO, FUJITA e NETO, 1996).

O Brasil, envolvido no estabelecimento de um programa nuclear (PATTI, 2013), declinou do tratado no ano de 1967, tornando-se signatário apenas em 7 de dezembro de 1998, ação do então presidente Fernando Henrique Cardoso (BRASIL, 1998a). Atualmente, o Brasil faz parte de outros dois tratados que visam a aplicação de tecnologias nucleares apenas com fins pacíficos, o Tratado para a Proscrição das Armas Nucleares na América Latina e no Caribe

(Tratado de Tlatelolco) (BRASIL, 1994), e o Tratado de Proibição Completa de Testes Nucleares – CTBT (BRASIL, 1998b).

Do ponto de vista científico, o Projeto Manhattan também deixou consequências, modificando a maneira como a pesquisa é pensada e as formas de comunicação.

> O sigilo envenenou o ambiente científico e até hoje esse veneno ainda não foi totalmente eliminado. O sigilo militar obviamente é necessário e o sigilo industrial é uma prática estabelecida e justificável, mas o sigilo científico é uma proposição autocontraditória. Por definição, as ciências devem repartir os conhecimentos e revelar suas descobertas a todo o mundo. (SEGRÈ, 1987, p. 223)

Por fim, destaco que o projeto Manhattan não retrata apenas o desenvolvimento de armas nucleares, mas também consequências políticas e modificações drásticas na própria organização da ciência global. Discussões relacionadas a este momento histórico, por se tratar de um tema transversal a diversas disciplinas escolares, podem contribuir para ampliar as concepções acerca da prática cientifica, tal como discutir conceitos físicos a partir de um determinado contexto sócio-histórico.

Dentre os diversos fatores relacionados à natureza da ciência que podem ser evidenciados com a exposição deste episódio histórico, como o caráter coletivo do trabalho científico, a variedade de métodos empregados na pesquisa e o mito da neutralidade científica, tenho como objetivo olhar para as questões éticas que permeiam a prática científica, em específico às responsabilidades sociais daqueles que realizam esta prática. Nas páginas seguintes apresentarei o contexto e as características destas responsabilidades.

2. AS RESPONSABILIDADES SOCIAIS DOS CIENTISTAS

O episódio histórico apresentado na seção anterior torna evidente a relação entre a produção de conhecimento e as inovações tecnológicas voltadas para a guerra, relação esta que tem acompanhado o desenvolvimento das sociedades.

Neste sentido, Rezende e Ávila (2014) apresentam algumas inovações tecnológicas que modificaram significativamente a natureza dos conflitos entre povos, alguns exemplos notórios são: o processo de domesticação dos cavalos, seguido pela invenção do estribo, que possibilitou o advento da cavalaria (largamente utilizada durante a Era Medieval); o uso da pólvora que, associada a tecnologias de fundição, possibilitou a produção de armas de fogo, predominantes nos conflitos até os dias atuais; e mais recentemente, durante a primeira guerra mundial, o investimento expressivo para a fabricação de submarinos, aviões e tanques, tal qual o surgimento dos gases venenosos.

Deste modo, o PM não representa o início de uma cultura científica voltada para fins militares, mas o ápice da relação entre as inovações tecnológicas e o fenômeno bélico, tendo em vista que, quando colocados à disposição da sociedade, os armamentos nucleares mudaram qualitativamente o modo de resolução de conflitos e a própria natureza da guerra (MACDOWELL, 1988).

Entretanto, como visto no capítulo anterior, as implicações destas inovações tecnológicas não se limitaram aos conflitos diretos, mas produziram um novo contexto geopolítico em escala global, pautado pela incerteza de uma eminente destruição da humanidade, intensificado pela busca de armamentos cada vez mais poderosos.

Portanto, a partir desta relação complexa entre ciência e sociedade, tendo em vista o papel transformador da ciência no modo de vida humano, surge a necessidade de pensar as responsabilidades sociais vinculadas à produção do conhecimento. Concordo com Synge (1953) ao apontar que, a partir do desenvolvimento das tecnologias bélicas da primeira metade do século XX, a ciência, ao invés de trazer as soluções esperadas pela população, acabou por desenvolver novas preocupações e, consequentemente, obteve novas responsabilidades.

Mitcham (1987, p. 8) indica que, ao longo dos anos, as reflexões acerca das responsabilidades sociais dos cientistas estiveram atreladas a duas tradições de pensamento sobre as relações entre ciência e sociedade, apresentadas no quadro abaixo.

Quadro 2 –Diferentes tradições de pensamento sobre as responsabilidades dos cientistas

Tradições	Compreende a ciência como ...	Implicações sociais	Responsabilidades dos cientistas
Primeira e mais antiga tradição	uma forma restrita de conhecimento	Potencial ameaça à ordem social	Limitar suas pesquisas e refletir sobre o conhecimento
Segunda e mais moderna tradição	a melhor maneira de lidar com o conhecimento	Essencial e sempre benéficas para a sociedade	Prosseguir e ampliar as pesquisas para atender as demandas

Fonte: Mitcham (1987, p. 8)

Entretanto, durante o século XX, ocorreram dois eventos que modificaram a compreensão sobre o tema, criando uma tentativa de pensar as responsabilidades a parir da união destas duas tradições (MITCHAM, 1987). O primeiro destes eventos, o Projeto Manhattan, levou os pesquisadores a reconhecerem a existência de implicações negativas de seus trabalhos e, desta maneira, a necessidade de discuti-las academicamente. Por sua vez, durante a década de 70, pesquisas sobre DNA recombinante evidenciaram novos riscos sociais proeminentes da prática científica, acarretando discussões que questionariam não apenas as implicações sociais, mas também a lógica interna da ciência.

Com intuito de compreender este desenvolvimento sobre o conceito de responsabilidade social dos cientistas e descrever tais responsabilidades, este capítulo compreende uma investigação teórica acerca do tema, afim de apresentar a fundamentação teórica desta pesquisa.

Afim de evidenciar as contribuições do PM para as discussões éticas do trabalho científico, apresento, em um primeiro momento, algumas concepções de cientistas que participaram do projeto e emitiram suas opiniões acerca do tema. Para isso, utilizo de relatos e documentos que evidenciam a necessidade de pensar as implicações práticas do trabalho científico, produzidos à época e posteriores ao projeto, tanto pelos cientistas investigados quanto por seus pares.

Na sequência, apresento o desenvolvimento das concepções acerca das RSC ao longo dos anos, dividido em dois períodos. O primeiro deles, originado das pesquisas nucleares, que visava questionar exclusivamente as implicações sociais da pesquisa científica. Já o segundo período, diz respeito a concepções sobre a ética do trabalho científico, influenciadas pelas pesquisas sobre DNA recombinante, que questionavam não apenas as implicações sociais, mas também a própria natureza do trabalho científico e o modo de compreender a ciência.

Por fim, conceitualizo e discuto a fundamentação acerca das responsabilidades sociais dos cientistas, em busca de responder quais são estas responsabilidades e como se manifestam em trabalhos recentes sobre o tema.

2.1 As Responsabilidades Sociais para integrantes do Projeto Manhattan

Apesar do ambiente hostil a indagações sobre o mérito moral do Projeto Manhattan, houve pesquisadores que, durante o desenvolvimento das armas nucleares, apresentaram objeções sobre as possíveis implicações sociais resultantes do sucesso do projeto. Entendo ser interessante destacar as contribuições de Leo Szilard e Joseph Rotblat ao levantar reflexões morais no meio científico, a fim de compreender de que maneira os pesquisadores pensavam seus papeis frente ao desenvolvimento tecnológico.

Tal como discutido no primeiro capítulo, Szilard, motivado pelo medo de uma bomba atômica alemã, se mostrou fundamental para a consolidação do projeto nuclear norte americano e para o desenvolvimento do primeiro reator nuclear. Entretanto, ao decorrer do projeto, se mostrou resistente a ordens militares e contrário à política de compartimentalização do conhecimento.

Em um documento intitulado “What is wrong whit us”, Szilard (1942) critica a organização do projeto e discute o que considerou ser os dois principais problemas até o momento: a burocracia que atrasava a tomada de decisões dos cientistas e a escolha por um sistema de resfriamento para a planta nuclear.

Ainda, Szilard (1942, p. 154, tradução minha) demonstra preocupação às implicações sociais da energia nuclear ao indicar que “talvez seja bom dedicarmos mais tempo de pensamento às necessidades políticas mais amplas

que resultarão do nosso trabalho". O autor compreendia que as responsabilidades seriam repartidas dentre os participantes do projeto, de modo que cada cientista deveria refletir sobre sua participação quanto a utilização da bomba.

> ...aqueles que originaram o trabalho nesta arma terrível e aqueles que contribuíram materialmente para o seu desenvolvimento, têm, perante Deus e o Mundo, o dever de zelar para que seja usada na hora e da maneira correta. (SZILARD, 1942, tradução minha)

Apesar de suas tentativas em discutir o pós-guerra e o papel do cientista no desenvolvimento das bombas, Szilard não obteve sucesso em impulsionar as questões morais no meio acadêmico. Por outro lado, com objetivo de combater as reflexões de Szilard, Grooves o classificou como um possível espião inimigo, tendo dificultado seu acesso às demais pesquisas do projeto.

Em 1945, após a derrota da Alemanha e com o ritmo acelerado no desenvolvimento de armas nucleares, Szilard tornou a reforçar seus argumentos contra a utilização das bombas, ao questionar qual o propósito de continuar seu desenvolvimento, uma vez que, segundo ele, o principal objetivo de parte dos cientistas seria o de reduzir uma ameaça nazista (SZILARD, 1978, p. 181). Em seguida tentou encaminhar um memorando com as discussões para o presidente dos EUA, não obtendo sucesso.

Dentre as discussões com os demais pesquisadores, destaca-se a resposta de Teller, ao indicar que decidiu não agir em relação às objeções impostas. Na opinião do cientista, a responsabilidade deveria também ser compartilhada com o público, uma vez que a decisão de utilizar a bomba viria de seus representantes.

> O acidente de termos trabalhado nessa coisa terrível não deve nos dar a responsabilidade de ter voz sobre como ela deve ser usada. Essa responsabilidade deve, no final, ser transferida para o povo como um todo e isso só pode ser feito tornando os fatos públicos. Esta é a única causa pela qual me sinto no direito de fazer algo: a necessidade de levantar o sigilo, pelo menos no que diz respeito às questões amplas de nosso trabalho. (TELLER, 1945, tradução minha).

Com o fim do Projeto e os indicativos de que a bomba seria usada contra cidades japonesas, Szilard escreveu uma petição com intuito de

demonstrar a insatisfação dos cientistas frente a situação “Achei que havia chegado a hora de os cientistas protestarem contra o uso da bomba em cidades Japonesas, por motivos morais” (SZILARD, 1978, p. 187, tradução minha).

No texto, o cientista alerta para os perigos do pós-guerra em caso de os EUA utilizar as bombas contra o Japão, afirmando que o ato poderia desencadear uma corrida por armamentos ainda mais poderosos entre as principais potencias mundiais. Por fim, recomenda que a decisão em utilizar as bombas deveria considerar tanto seus argumentos quanto as demais responsabilidades morais envolvidas (SZILARD, 1978, p. 211).

Apesar de seus esforços, Szilard encontrou diversas dificuldades em circular a petição dentre os cientistas, alcançando um total de 68 assinaturas. Ao escrever sobre o ocorrido, ele destacou a ausência de assinaturas por parte dos químicos, que argumentavam que a decisão deveria apenas levar em conta se mais vidas seriam salvas ao usar a bomba ou continuar a guerra.

> Que algum outro problema poderia estar envolvido em jogar uma bomba em uma cidade habitada e matar homens, mulheres e crianças não ocorreu a nenhum dos químicos com quem falei. (SZILARD, 1978, p. 180, tradução minha)

Devido aos entraves burocráticos e a imposição de sigilo, não há evidência de que a petição foi lida pelo presidente. Após o uso das bombas, Szilard tentou desclassificar a petição para que pudesse publicá-la, uma vez que a bomba atômica havia se tornado de conhecimento público, entretanto teve dificuldades ao ser ameaçado de perder seu cargo de pesquisador.

Da mesma maneira, Joseph Rotblat foi um importante físico para o desenvolvimento das bombas atômicas, mas que ao longo dos anos se mostrou fundamental na luta contra a ameaça nuclear, recebendo o Prêmio Nobel da Paz em 1995 por “seus esforços para diminuir o papel desempenhado pelas armas nucleares na política internacional e, a longo prazo, para eliminar tais armas” (NOBEL PRIZE, 2022, tradução minha).

Ao ler sobre a fissão do Urânio, assim como outros cientistas em outros países, Rotblat repetiu os experimentos e evidenciou a emissão de nêutrons durante a fissão nuclear, concluindo para a possiblidade de uma explosão. Motivado pelo medo de que os alemães pudessem fabricar a bomba, Rotblat

se dedicou a investigar a viabilidade de sua produção, encontrando que tal empreendimento era viável do ponto de vista científico, mas que os esforços necessários excediam a capacidade industrial da Inglaterra. Pouco tempo depois, Rotblat se reuniria aos demais cientistas envolvidos no Projeto Manhattan.

Em março de 1944, Rotblat fora surpreendido por uma fala de Grooves, na qual o general aponta que o real propósito de fabricar a bomba seria para subjugar os soviéticos. Este fato demonstra os interesses econômicos e geopolíticos que pairavam sob o projeto de fabricação das bombas, de modo a confrontar narrativas que tentam eximir as responsabilidades argumentando que o projeto tinha como objetivo único e exclusivo combater a Alemanha nazista e pôr fim à guerra.

Já no fim de 1944, quando ficou evidente que os alemães haviam abandonado o projeto da bomba, o cientista pediu permissão para retornar à Grã-Bretanha. Em sua saída, foi confrontado e perseguido, tendo de se comprometer a não contar aos demais cientistas a verdadeira razão de sua retirada.

> Até então, eu pensava que nosso trabalho era impedir uma vitória nazista, e agora me disseram que a arma que estávamos preparando era para ser usada contra pessoas que faziam sacrifícios extremos por esse mesmo objetivo. (ROTBLAT, 1985, p. 18, tradução minha)

Em um relato publicado em agosto de 1985, Rotblat reflete sobre o por que outros cientistas não deixaram o projeto quando ficou conhecido que o projeto alemão não teria condições de avançar, uma vez que, para o cientista, esta era a principal motivação de grande parte dos pesquisadores. Neste documento, Rotblat afirma ter dialogado sobre o tema com outros cientistas integrantes do projeto, antes e depois de sua saída, estes diálogos o levaram a perceber três principais atitudes morais presentes naquele contexto científico.

A primeira é evidenciada pela pura e simples curiosidade científica, estes cientistas acreditavam que apenas deveriam debater o uso da bomba após os testes mostrarem o sucesso do projeto. O segundo grupo acreditava no argumento de que o uso da bomba traria um fim rápido à guerra contra o Japão, salvando a vida de muitos estado-unidenses. Por fim, o terceiro grupo compreendia que o projeto deveria ser interrompido. Porém, não se

manifestaram por medo de sofrer punições em suas carreiras como cientistas. Rotblat indicou que estes representavam a minoria dos pesquisadores.

> Os grupos que acabei de descrever - cientistas com consciência social - eram uma minoria na comunidade científica. A maioria não se incomodava com escrúpulos morais; eles estavam bastante contentes em deixar que outros decidissem como seu trabalho seria usado. (ROTBLAT, 1985, p.18, tradução minha)

Portanto, de acordo com Rotblat, poucos cientistas buscavam discutir as implicações sociais e éticas dos trabalhos que vinham desenvolvendo, muitas vezes guiados pela concepção de que estas questões excederiam suas obrigações como cientistas, e que deveria se ater apenas à produção e divulgação do conhecimento, na tentativa de compartilhar as responsabilidades pela condução de pesquisas com fins militares com a sociedade em geral e, mais especificamente, com os governantes, pela decisão de utilizar as bombas.

Com o fim do Projeto Manhattan e o lançamento das bombas atômicas, outros cientistas passaram a questionar as implicações sociais de seu trabalho. A seguir, serão apresentadas algumas destas discussões que consolidaram a responsabilidade social nos termos atuais.

2.2 Primeiro período: da responsabilidade sobre as implicações da pesquisa científica

Após o lançamento das bombas, alguns dos pesquisadores que trabalharam no Projeto Manhattan perceberam a necessidade de discutir quais medidas deveriam ser tomadas em relação à energia nuclear. Assim, em setembro de 1945, foi fundada uma organização chamada "*The Atomic Scientists of Chicago*", que possuía dois principais objetivos:

> 1.Explorar, esclarecer e formular a opinião e as responsabilidades dos cientistas em relação aos problemas trazidos pela liberação de energia nuclear, e 2. Educar o público para uma compreensão completa dos problemas científicos, tecnológicos e sociais decorrentes da liberação de energia nuclear. (BULLETIN, 1945).

Tendo em vista a escassez de posições políticas claras dos cientistas frente ao desenvolvimento tecnológico, alguns membros desta organização, tal

como Eugene Rabinowitch[81] e Hyman Goldsmith[82], fundaram o “Bulletin of the Atomic Scientists”, com o objetivo de desenvolver um espaço adequado para discussões sobre as implicações sociais e éticas do trabalho científico (WALL, 1975).

Não tardou para que surgissem comunicações com intuito de discutir os deveres e as responsabilidades dos cientistas, tendo em vista os impactos sociais da energia nuclear. Ao explorar o tema, Hill[83] (1946) apontou para a falta de padrões morais e aos problemas éticos da pesquisa científica. Para ele, apenas a experiência com a produção de conhecimento não torna o cientista apto a exercer funções políticas, entretanto, se mantêm as obrigações comuns de todos os cidadãos, ainda:

> Como cientistas, no entanto, eles têm o direito e o dever de questionar e discutir a natureza de sua própria profissão e sua contribuição especial para o bem-estar nacional e internacional. Eles devem sentir uma obrigação honrosa e inquebrável de manter a fé científica de franqueza, honestidade e integridade: a um sigilo nulo como condições necessárias de seu trabalho: tratar todos os cientistas honestos como seus colaboradores em uma causa comum: não explorar a propriedade comum da ciência para fins mesquinhos ou egoístas; e recusar condições de emprego ou avanço, por mais atraentes que sejam, que não atendam aos requisitos éticos mais importantes dos interesses comuns da humanidade. Eu acrescentaria mais um dever, recusar-se a cooperar em tarefas nas quais eles, ou seus representantes, não tenham uma participação razoável ou parceria na responsabilidade de decidir sobre o propósito, política ou resultado provável de seu trabalho. (HILL, 1946, p. 3, tradução minha)

Por fim, o autor argumenta que os cientistas devem tomar a iniciativa de construir padrões éticos de comportamento, com vistas a necessidade de

[81] Foi um biofísico norte americano integrante do Projeto Manhattan, que contribuiu para temas como energia nuclear e fotossíntese. Rabinowitch foi coautor do Relatório Franck, que pedia pela não utilização da bomba atômica, participou de diversos debates sobre questões éticas no Bulletin of the Atomic Scientist e, mais tarde, se tornou ativista e membro fundador da organização Pugwash, uma organização internacional que pedia pelo fim dos armamentos nucleares.

[82] Foi um físico norte-americano que trabalhou como coordenador de informações do Laboratório Metalúrgico de Chicago durante o Projeto Manhattan, após o projeto, se tornou coeditor do *Bulletin of the Atomic Scientists*, onde trabalhou até sua morte prematura em 1949, aos 42 anos.

[83] Archibald Vivian Hill (1886-1977) foi um fisiologista e biofísico britânico, que recebeu o prêmio Nobel de Fisiologia em 1922, por seus estudos sobre a produção de calor no músculo. Hill também atuou a favor de diversas causas sociais, tenso sido representando da Universidade de Cambridge no parlamento britânico entre os anos de 1940-1945.

manter a existência da humanidade em detrimento da construção de novas máquinas e organizações.

No ano seguinte, Franck[84] (1947) evidenciou a necessidade de os cientistas abandonarem a posição de neutralidade em relação aos problemas sociais. O autor entende que, além do trabalho acadêmico destinado à produção de conhecimento, os cientistas têm uma tarefa social a cumprir, no sentido de responder as necessidades da população e evitar a destruição total da humanidade.

Mais próximo a uma perspectiva educacional, Meier[85] (1948) questionou quais seriam os deveres dos cientistas que trabalharam com a energia atômica, tendo em vista o aparecimento de problemas sociais e de esforços internacionais derivados da área. O autor sugere que os cientistas devem se manter informados, promover educação pública, encontrar o ponto crucial do desentendimento internacional e aconselhar os governos em medidas específicas. Ele conclui:

> O cientista deve escolher os pontos onde a concentração do esforço pode dar maior contribuição para a criação de uma comunidade mundial: fazer discursos antes de audiências importantes, ajudar a produzir documentários, preparar materiais para o ensino e organizar programas de educação, propondo idéias adequadas à ação governamental no campo nacional ou estrangeiro, publicando revistas competentes, fornecendo material de apoio para imprensa, rádio e revistas. (MEIER, 1948, p. 82, tradução minha)

Os trabalhos citados discutiam a necessidade de os cientistas dedicarem maiores esforços a causas sociais, e utilizavam como principal argumento o caráter transformador das pesquisas destinadas à energia nuclear.

Estes trabalhos entendiam como responsabilidades dos cientistas: Refletir acerca da natureza de seu trabalho; pensar as implicações sociais,

[84] James Franck (1882-1964) foi um físico alemão que trabalhou com a cinética de elétrons, átomos e moléculas, recebeu o prêmio Nobel em 1925, por demonstrar as leis que regem o impacto de um elétron sobre um átomo. Franck atuou como diretor da Divisão de Química do Laboratório Metalúrgico da Universidade de Chicago. Destaca-se ainda as atuações políticas do cientista, por ser um dos primeiros a se manifestar abertamente contra as leis raciais na Alemanha e, durante o Projeto Manhattan, participar da elaboração do "Relatório Franck", que alertava os problemas do lançamento da bomba atômica e pedia para que não fossem utilizadas contra cidades habitadas sem aviso prévio.

[85] Richard Louis Meier (1920-2007) foi um arquiteto, deu aulas de Arquitetura, Planejamento Urbano e Regional, Arquitetura Paisagista e Planejamento Ambiental na Universidade da Califórnia. Meier foi um dos primeiros pensadores da importância da sustentabilidade no planejamento.

tanto para a melhora na qualidade de vida em termos de sociedade quanto para os riscos associados às pesquisas; lutar pelo fim do sigilo; e, por fim, trabalhar em medidas para a ampliação da compreensão do público acerca do dos saberes científicos.

Este movimento, no sentido de reconhecer as implicações sociais da ciência, calcado na primeira tradição evidenciada pelo quadro 2, foi inicialmente problematizado por egressos do PM, que negavam a atribuição de responsabilidades sociais aos cientistas, e reconheciam como legitimas apenas as responsabilidades acadêmicas, como: manterem-se informados acerca das novas pesquisas e divulgar todo conhecimento produzido.

Em uma de suas comunicações, Teller (1947) elenca dois desafios, o primeiro de construir medidas locais para o desenvolvimento atômico, como desenvolver uma legislação que assegurasse o máximo de benefícios deste desenvolvimento à população civil, e o segundo no sentido de alcançar a colaboração internacional entre todas as nações. Para Teller, estes desafios colocariam sobre os cientistas duas responsabilidades distintas, a primeira voltada para o desenvolvimento do conhecimento e a segunda para o desenvolvimento de uma sociedade na qual tal conhecimento não levaria à catástrofe global.

Além de responsabilidades gerais, Teller também apontou para responsabilidades específicas para a pesquisa nuclear, como: trabalhar para o sucesso e rápido desenvolvimento da energia nuclear, tornar a energia atômica algo útil no menor tempo possível e evidenciar todos os perigos e terrores provenientes das bombas atômicas.

> Temos dois deveres bem definidos: trabalhar com a energia atômica sob nossa atual administração e trabalhar para um governo mundial que é o único que pode nos dar liberdade e paz. Parece difícil assumir essas responsabilidades. Aceitar menos, acredito, é impossível. (TELLER, 1947, p. 355, tradução minha)

Oppenheimer (1948) ao discutir os papeis dos físicos na sociedade após a descoberta da energia atômica menciona quais seriam as responsabilidades a partir de seu ponto de vista. Para ele, a responsabilidade de um cientista deve ser com a integridade e o vigor de sua pesquisa, entendendo que o conhecimento não garante que o cientista se encontre em posição privilegiada

para prever os usos de sua produção. Destaca também que cabe ainda ao cientista, como professor, comunicar as verdades que encontra.

Este ambiente de tensões entre diferentes concepções sobre os deveres e responsabilidades dos cientistas, em especial àqueles que voltavam suas pesquisas para a energia nuclear, pode ser representado por um debate realizado no Bulletin of the Atomic Scientists, a partir de um trabalho publicado por Percy Williams Bridgman, em 1948, intitulado “Scientists and social responsability”, o qual foi comentado por diversos cientistas, de modo a evidenciar estas diferentes concepções acerca das RSC.

Bridgman[86] (1948) questiona qual seria a maneira mais inteligente de lidar com as aplicações das pesquisas científicas, e indica que a resposta deveria envolver aspectos da filosofia social e das relações entre ciência e sociedade. O autor constrói sua argumentação a partir da percepção de que as responsabilidades seriam impostas pela sociedade e não consentidas pela comunidade acadêmica.

> Dizer que ‘os cientistas são responsáveis pelos usos feitos das descobertas científicas’ implica que todo e qualquer cientista tem a obrigação moral de zelar para que os usos feitos pela sociedade das descobertas científicas sejam benéficos. Significa que tenho uma obrigação moral e que, se não cumprir esta obrigação, será considerado culpado pela sociedade e poderá ser punido. A disciplina que seria imposta é óbvia, a saber, a perda da liberdade científica. (BRIDGMAN, 1948, p. 69, tradução minha)

Para sustentar a hipótese de que responsabilidades acarretariam perda de liberdade, Bridgman parte da idealização de uma sociedade individualista, na qual o sujeito seria recompensado a partir de suas ações. Neste sentido, indica que existiam três estágios para as relações do indivíduo com a sociedade.

> O primeiro concedia aos brilhantes o direito de explorar os ignorantes; o segundo reconhecia o direito de todos a receber da sociedade uma recompensa proporcional à sua contribuição; e o terceiro e atual

[86] Percy Williams Bridgman (1882-1961) foi um notório físico estadunidense, tendo recebido o prêmio Nobel em 1946 devido a suas pesquisas sobre a física de altas temperaturas e pressões. Bridgman contribuiu também para a cristalografia, ao estudar os monocristais, e para a filosofia da ciência, a partir da abordagem “operacional” do significado científico.

> estágio reconhece o direito dos ignorantes de explorar os brilhantes. (BRIDGMAN, 1948, p. 70, tradução minha)

Assim, o autor argumenta que a imposição de responsabilidades aos cientistas representa um modo de exploração dos cientistas pelos demais cidadãos. Para ele, a solução para a administração das aplicações científicas estaria em critérios de decência e auto respeito, tal como da criação de mecanismos de recompensa capazes de atrair a atenção dos cientistas para os problemas sociais. Neste sentido, os estudos sobre responsabilidade se caracterizariam, nas palavras do físico, como "uma filosofia jovem, entusiástica, idealista e colorida pela ânsia de auto-sacrifício".

Percebe-se que a visão de sociedade defendida pelo pesquisador se faz fundamentada sob aspectos de individualidade e liberdade, portanto, balizada por uma ideologia liberal de sociedade na qual os interesses individuais sobrepõem os interesses coletivos. Nesta concepção, responsabilidades sociais se configurariam como limitações ao trabalho científico, e deveriam existir apenas na esfera moral de cada cidadão.

Em resposta ao trabalho de Bridgman, foi publicada um artigo com a opinião de diversos cientistas notáveis sobre seus pensamentos. Urey[87] criticou o objetivo do pesquisador de remover dos cientistas tais reponsabilidades, entendendo que estas não precisariam ser impostas pela sociedade, mas assumidas pelos próprios pesquisadores (UREY et al., 1948). Rabi[88], por sua vez, indicou que a principal responsabilidade social, aceita pela comunidade e ignorada por Bridgman, é a de publicar seus resultados de maneira clara e objetiva (UREY et al., 1948, p. 73).

Com intuito de problematizar a perda da liberdade científica, Herbert Goldhamer argumenta que, com o aumento da consciência pública sobre o trabalho do cientista e as profundas modificações no bem estar coletivo, aumentou também a percepção da necessidade de supervisão deste trabalho. Portanto, a perda de autonomia já seria uma realidade. Como maneira de lidar

[87] Harold C. Urey (1893-1981) foi um físico e químico estadunidense, trabalhou com problemas relacionados a estrutura atômica, tendo recebido o prêmio Nobel de química em 1934 pela identificação do deutério. Durante o Projeto Manhattan, Urey desenvolveu pesquisas voltadas para a separação do isótopo do urânio, parte fundamental para concretização da bomba lançada sob Hiroshima.
[88] Isidor I. Rabi (1898-1988) foi um físico nuclear estadunidense que recebeu o prêmio Nobel de física em 1944, por seu método de ressonância para registrar as propriedades magnéticas de núcleos atômicos. Durante a década de 40, Rabi participou do laboratório de Radiação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, em pesquisas sobre o radar e a bomba atômica.

com as restrições impostas ao trabalho científico, Goldhamer aponta duas tarefas principais: 1) convencer o público em geral de que a supervisão não resolverá os problemas; e 2) Aliviar as consequências das aplicações, cuja ansiedade motiva a tendência a supervisão (UREY et al., 1948, p. 73).

Por fim, as críticas mais enfáticas à evasão das responsabilidades vieram dos comentários de Eugene Rabinowitch. O cientista aponta que Bridgman vê a sociedade como uma soma de indivíduos e não como um organismo vivo, logo, haveria pouco espaço para os coletivos e as responsabilidades seriam atreladas apenas a percepções individuais. Ao discordar, Rabinowitch argumenta que o conhecimento teórico e prático adquirido pelos cientistas permite com que deem maiores contribuições à sociedade, contribuições estas que apenas seriam materializadas por meio de participação da classe nos assuntos do estado. O autor finaliza com o indicativo de que fugir destas responsabilidades poderia levar à destruição de toda a humanidade pelo uso das tecnologias produzidas pelos cientistas (UREY et al., 1948, p. 75).

> ...em uma civilização em que a tecnologia desempenha um papel crucial, o conhecimento factual, a percepção das possibilidades futuras e a objetividade geral e a universalidade da ciência não devem ser ausentes dos conselhos políticos. (UREY et al., 1948, p. 75, tradução minha)

Aqueles que negavam as RSC argumentavam que discutir tais responsabilidades implicaria na perda de autonomia do trabalho científico, a partir de dispositivos repressivos e autoritários que delimitariam as pesquisas aos interesses de terceiros. Esta concepção possui uma concepção de ciência neutra em relação às questões sociais, e motivada apenas pelos interesses individuais dos cientistas.

Por sua vez, os que indicavam a necessidade de pensar as RSC argumentavam que esta perda de liberdade já estava colocada, uma vez que as profundas transformações sociais derivadas das pesquisas acadêmicas alertaram o público para a necessidade de pensar o desenvolvimento tecnológico, afim de evitar uma catástrofe global. Para este grupo, pensar as RCS significaria defender a autonomia do trabalho científico, uma vez que a pauta seria pensada a partir dos próprios cientistas.

Portanto, de um lado estavam os cientistas que reconheciam as implicações sociais do trabalho acadêmico e, consequentemente, o surgimento de novas responsabilidades e deveres, fundamentados em grande medida pelas implicações tecnológicas derivadas da energia nuclear. Por outro lado, outros pesquisadores negavam a existência destas responsabilidades, tendo em vista que o cientista seria responsável apenas por produzir novos conhecimentos e tecnologias, enquanto seus usos seriam de responsabilidade da sociedade, a partir de seus representantes políticos.

Com o avanço das pesquisas nucleares e o acirramento das relações entre os Estados Unidos e a União Soviética, a necessidade de pensar as implicações foram ficando mais evidentes. Assim, em 1949, foi fundada a Sociedade pela Responsabilidade Social na Ciência (SRSC), por Victor Paschkis, em Haverford. Em sua grande maioria, era formada por cientistas lotados em universidades estadunidenses, entretanto, haviam também correspondentes internacionais, como Charles A. Coulson (Oxford University); Kathleen Lonsdale (University College London); Shigeru Oae (Institute for Scientific and Industrial Research, Japan); e Priyadaranjan Ray (Chemical Society of India).

A SRSC era composta por cientistas que reconheciam as responsabilidades pessoais tendo em vista as consequências da pesquisa científica, e tinha como objetivo combater o medo que limitava a livre expressão entre os cientistas, afim de incentivar novas manifestações acerca das relações entre ciência e sociedade.

> A Sociedade pela Responsabilidade Social na Ciência considera que cada pessoa tem a responsabilidade individual e moral de considerar os resultados finais de seu trabalho até onde possa vê-los. Esta é uma responsabilidade para com a sociedade e implica uma forte insistência na expressão pública de opiniões. Encontramos hoje um sério crescimento do medo de tal expressão pública. (SOCIETY FOR SOCIAL RESPONSIBILITY IN SCIENCE, 1953, p. 3, tradução minha).

Neste mesmo ano, em 1949, houve também o primeiro teste de armamento nuclear realizado pela União Soviética, denominada RDS-1, similar à bomba lançada sobre a cidade de Nagasaki. O teste bem sucedido pôs fim

ao monopólio nuclear norte americano, estabelecendo novos parâmetros para a disputa geopolítica global, uma vez que a militarização e a produção de armas nucleares cada vez mais destrutivas se tornou prioridade para ambas as nações.

Deste modo, as hipóteses de que o desenvolvimento e utilização das bombas atômicas desencadeariam uma corrida armamentista mostraram-se corretas. Este contexto reforçou a necessidade de pensar as RSC, que receberia contribuições diversas nos anos seguintes, de modo que as críticas à concepção de neutralidade se tornariam ainda mais enfáticas.

Neste período, Einstein (1952, p. 34) escreveu sobre a obrigação moral do cientista, questionando qual a posição assumida pelos cientistas como membros da sociedade frente a mudanças sociais causadas pelos novos saberes. Einstein compreendeu que a classe se via orgulhosa pelos desenvolvimentos tecnológicos, entretanto, angustiada pela criação de novas ameaças e pela concentração de poder político.

> ...a concentração do poder econômico e político nas mãos de poucos não só tornou o cientista economicamente dependente, como também ameaça sua independência interna. (Einstein, 1952, p. 35, tradução minha)

Na visão de Einstein, os cientistas sofreram um “fim verdadeiramente trágico”, uma vez que com esforços sobre-humanos produziram as ferramentas que foram usadas para escravizá-los e destruí-los. Ele compreende que os cientistas aceitaram este destino como inevitável e, com intuito de combater esta posição passiva, estimula para que pensem de maneira crítica e honesta sobre a situação do trabalho científico a partir de uma perspectiva socialmente inserida.

Em 1953, o químico britânico Richard Laurence Millington Synge[89], argumentou que o desenvolvimento científico e tecnológico, ocorrido durante os cinquenta anos anteriores, não trouxe os benefícios que a população esperava, tendo em vista que as principais aplicações do desenvolvimento científico daquele momento eram voltadas para a guerra.

[89] Richard Laurence Millington Synge (1914-1994) foi um químico britânico que, junto de John Porter Martin, recebeu o prêmio Nobel de química em 1944, pela invenção da cromatografia de partição. Nos anos seguintes, Synge se dedicou aos estudos sobre moléculas e proteínas.

> Antes da Segunda Guerra Mundial, a aplicação da ciência era negligenciada; durante e desde a guerra, a atitude oficial mudou - os governos haviam finalmente aprendido algo sobre o poder da ciência aplicada, e agora, em grande medida, eles estão a direcioná-la para objetos que, na melhor das hipóteses, são improdutivos e inúteis e, na pior, podem provocar destruição em uma escala sem precedentes. (SYNGE, 1953, p. 63)

Synge expôs que os cientistas deveriam sentir mais responsabilidade pela direção tomada pelo progresso da ciência, e argumentou a favor de um acordo que levasse a um desarmamento suficientemente controlado e a um controle e contabilização eficaz dos materiais radioativos.

Ao escrever sobre as relações entre o público, os governantes e os cientistas, Bronowski[90] (1956) questiona quais seriam as responsabilidades de cada um destes grupos. O autor aponta que os cientistas têm o dever de informar o público e participar na tomada de decisões em assuntos relacionados à ciência, enquanto o público deve manter-se informado sobre os avanços do conhecimento. Por sua vez, os governantes devem permitir e facilitar este diálogo, e ainda garantir liberdade aos cientistas em contribuir ou não com determinadas áreas de pesquisa. Caso estas responsabilidades não fossem assumidas, a condução da pesquisa científica estaria vulnerável a interesses externos.

Por sua vez, Russell (1960) compreendia que os cientistas não poderiam mais se esquivar da responsabilidade pelo uso que a sociedade faz de suas pesquisas. Para o pesquisador, fazia-se necessário que os cientistas expusessem suas opiniões ao público, de maneira a pressionar os governantes a atender demandas sociais. Ele acrescenta, por fim, acreditar haver uma posição privilegiada dos cientistas, em relação aos demais, no que se refere a construção de uma sociedade mais esperançosa e menos autoritária.

Já, a existência de uma neutralidade moral dos cientistas passou a ser questionada. Weaver et al. (1961) corroboram a compreensão de que os cientistas não devem se abster de questões éticas quanto ao empreendimento científico, uma vez que os efeitos desta abstenção seriam prejudiciais a toda

[90] Jacob Bronowski (1908-1974) foi um matemático e historiador polonês-britânico, conhecido por seus trabalhos de divulgação científica ao escrever e apresentar a série *The Ascent of Man*, em 1973, na BBC TV.

humanidade, eles afirmam que os cientistas têm o dever de questionar e, se necessário, se abster de determinados empreendimentos, no sentido de reduzir os riscos de uma utilização não esperada. Ainda, questionam a capacidade científica de fornecer verdades absolutas, de maneira a pensar a ciência como construção humana, desenvolvida a partir de um conjunto de condições previamente estabelecidas.

Ao proferir uma palestra na Universidade da California, em julho de 1966, Marcuse (2009, p. 160) propõe que “a ciência (isto é, o cientista) é responsável pelo uso que a sociedade faz da ciência; o cientista é responsável pelas consequências sociais da ciência”, para ele, esta proposição é justificada pelo lugar e função da ciência na realidade social atual. Ainda, o autor compreende que, ao ser publicado, o conhecimento se transforma em mercadoria, de maneira a adquirir valor social.

> ...através de sua relação com as necessidades sociais prevalecentes, o trabalho do cientista adquire um valor social; seu trabalho incorpora as características das tendências sociais predominantes e torna-se progressivo ou regressivo, construtivo ou destrutivo, libertador ou repressivo em termos da proteção e melhoramento da vida humana. (MARCUSE, 2009, p. 160)

Desta maneira, o caráter transformador do conhecimento científico existiria em sua relação com as esferas sociais. Marcuse questiona se esse argumento justifica a neutralidade e indiferença morais da ciência. Para ele, a resposta é não.

> O cientista permanece responsável enquanto cientista porque o desenvolvimento social e a aplicação da ciência determinam, em considerável medida, o posterior desenvolvimento conceitual interno da ciência. O desenvolvimento teórico da ciência é assim enviesado em uma direção política específica, e a noção de pureza teórica e neutralidade moral é assim invalidada. (MARCUSE, 2009, p. 161)

Para ele, não há separação entre o mundo da ciência e da política, entre o reino da teoria e da prática, “existe apenas um mundo no qual a ciência, a política e a ética, a teoria e a prática estão inerentemente ligadas” (MARCUSE, 2009, p. 160).

Ao tratar sobre o tema, Popper (1971) busca traçar um juramento análogo ao Juramento de Hipócrates para a atividade científica. Para o autor,

tal juramento deveria ser dividido em três partes: a) Os cientistas devem se dedicar a uma busca por uma melhor aproximação da verdade, de maneira a reconhecer a finitude e falibilidade de nosso conhecimento; b) Têm o dever de ser crítico consigo mesmo e com os outros; e c) Uma vez que o conhecimento tem o potencial de afetar uma grande quantidade de pessoas, o cientista deve tentar prever e prevenir qualquer possível perigo e uso indevido de seus resultados.

Popper busca ainda problematizar o trabalho do cientista durante períodos de guerra, reconhecendo a dificuldade moral envolvida no processo de tomada de decisões. Entretanto, argumenta que as responsabilidades dos cientistas vão além de sua conexão com guerras ou armamentos, mas inserem-se na própria natureza do trabalho científico.

Em sua análise, Popper difere as responsabilidades de cientistas sociais e naturais. Os primeiros, ao perceber manifestações de poder que possam colocar em risco a liberdade, além de alertar as pessoas sobre os perigos, devem também se dedicar a investigação de contramedidas eficazes. Quanto aos cientistas naturais, estes devem considerar uma de suas responsabilidades especiais prever, tanto quanto possível, as consequências não intencionais de seu trabalho, de maneira a reconhecer aquelas as quais devem ser evitadas.

Portanto, neste primeiro período, os trabalhos acerca das RSC reconhecem que os desenvolvimentos científicos, se negligenciados do ponto de vista social, poderiam apresentar efeitos negativos à qualidade de vida, através da produção de armamentos nucleares e seus impactos sociais, políticos e econômicos.

Apesar de a ciência ainda ser tratada como uma busca por novos saberes, para a qual seria necessária manter intacta a liberdade de investigação do pesquisador, surgem aspectos que questionam a prática científica, como o reconhecimento de seu potencial para a transformação social e da necessidade de pensar, no decorrer das pesquisas, as possíveis consequências, em oposição a concepção de neutralidade científica.

2.3 Segundo período: sobre a ética na ciência e a pesquisa socialmente responsável

Já na década de 70, as críticas sobre a fuga das responsabilidades por parte dos cientistas se tornaram mais enfáticas e frequentes, buscando questionar não só as implicações sociais, mas também elementos estruturantes do fazer científico. Deste modo, a compreensão sobre as responsabilidades sociais dos cientistas foi se desprendendo das questões práticas e considerando cada vez mais elementos epistemológicos da ciência.

Esta mudança de concepção teve origem com o aumento da preocupação em relação ao problema da poluição ambiental, que não poderia ser resolvido por meio da desmilitarização ou controle democrático das novas tecnologias.

Em um livro intitulado "*Scientific Knowledge and Its Social Problems*", Ravetz (1971, p. 66) argumentou que o contexto socioeconômico do século XX fez com que diversos países avançassem com o processo de industrialização da ciência, que produziria riscos tanto para a ordem social quanto ao meio ambiente, devido a crescente exploração e a disputa por hegemonia entre as nações. Para o autor, este processo produziu também um novo conjunto de problemas morais, internos à ciência, incapazes de serem solucionados a partir de uma concepção em termos da busca pela verdade e propriedade intelectual.

Neste sentido, Ravetz (1971) argumenta a favor do desenvolvimento de uma ciência crítica, em substituição à ciência acadêmica, de maneira que o bem-estar social e a participação ativa dos membros da comunidade prevalecesse sob os demais interesses, afim de fundamentar "uma nova concepção da humanidade em suas relações consigo mesma e com a natureza" (p. 429).

Nos anos seguintes, as discussões sobre as RSC se voltaram para os riscos produzidos pelas pesquisas sobre DNA recombinante. Apesar de enxergar contribuições tecnológicas significativas, Paul Berg[91] reconheceu que

[91] Paul Berg (1926-2023) foi um bioquímico estadunidense que trabalhou com modificações genéticas, tendo recebido o prêmio Nobel de química em 1980, por desenvolver as técnicas necessárias para a produção de DNA híbridos, estas técnicas possibilitaram a criação de bactérias que produzem substâncias usadas em medicamentos. Entretanto, Berg reconheceu os riscos das pesquisas genéticas, tanto para os pesquisadores quanto para os sujeitos participantes, a partir disto, mobilizou a comunidade acadêmica da

a ausência de cuidado na busca por novas tecnologias poderia causar graves consequências para a saúde humana e para o meio ambiente.

> Em meados de 1974, eu havia liderado um comitê que comunicou essas preocupações ao presidente da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos e as publicou na Science, Nature e na Proceedings of the National Academy of Sciences. Recomendamos uma suspensão voluntária em certos experimentos de DNA recombinante que haviam sido considerados potencialmente perigosos. (BERG, 2008, p. 290, tradução minha)

Estas recomendações levaram, em fevereiro de 1975, a uma reunião de 140 cientistas estadunidenses e estrangeiros, que trabalhavam com modificações genéticas, no estado da Califórnia, esta reunião ficou conhecida como Conferência de Asilomar, e tinha como objetivo "considerar o levantamento da suspensão voluntária e, em caso positivo, quais condições impor para garantir que a investigação pudesse prosseguir em segurança" (BERG, 2008, p. 290, tradução minha).

Os participantes decidiram que as pesquisas deveriam continuar, entretanto, sob um conjunto rigoroso de restrições, de maneira que deveriam ser suspensas pesquisas consideradas de alto risco (BERG et al., 1975, p. 1983). Para Berg (2008, p. 290), esta conferência "marcou o início de uma era excepcional para a ciência e para a discussão pública da política científica".

Quanto às responsabilidades, Asilomar demonstrou que a comunidade científica norte-americana, voltada às questões da biologia genética, mesmo que temporariamente, se propuseram a renunciar a certos tipos de pesquisa (MITCHAM, 1987, p. 12). Portanto, a atenção não se voltava apenas para a aplicação do conhecimento, mas também aos métodos e à capacidade do trabalho científico em produzir riscos.

> O novo aspecto... é que os próprios cientistas estão começando a criticar e questionar o papel do pesquisador e seu direito a uma busca irrestrita pela verdade. (MITCHAM, 1987, p. 12, tradução minha)

No final da década de 70, na visão de um país periférico e a partir de uma análise da organização social em um mundo capitalista no século XX, no

---

área a discutir o uso responsável da tecnologia, este ato levou, em 1976, à elaboração das diretrizes para a segurança dos experimentos com DNA recombinante.

qual a dinâmica de acumulação do capital gera desigualdades profundas, Furtado (1979, p. 1101) expõe que a ciência “não pode ser entendida se não a relacionarmos com os fins que presidem a ordenação da vida social em nossa civilização”. Ainda, segundo o autor, três aspectos guiariam a criatividade tecnológica dos cientistas: a) a luta pelo poder em escala planetária; b) a preservação das estruturas de dominação social; e c) a liberação do homem e a satisfação de suas necessidades.

Furtado questiona quais seriam as responsabilidades dos cientistas nesta estrutura global, especificamente na periferia deste globo. Para o autor, os cientistas possuem papel fundamental no processo de transformação social, dada a posição privilegiada em perceber as relações de dependência estabelecidas entre o centro do capital e a periferia, tal como a produção de valores voltados para os fins da vida humana.

> ...se os cientistas tomam plena consciência da significação última do que produzem, em tanto que valores sociais e humanos, do contexto social em que estão inseridos e da situação de dependência a que têm sido relegado o nosso país, terão, necessariamente — como cidadãos ou como força social organizada — que contribuir de forma decisiva para colocar a ciência e a tecnologia a serviço da solução dos sinceros problemas que enfrenta a nossa sociedade. (Furtado, 1979, p. 1102)

Verhoog (1981, p. 583, tradução minha) indica que as RSC deveriam ser pensadas sob critérios éticos, não se referindo às responsabilidades “pelo conhecimento científico como tal, mas pelos padrões e estruturas culturais, políticas e econômicas de sua própria sociedade e de outras sociedades”.

Assim, a partir de trabalhos voltados à natureza da ciência, Verhoog (1981) identificou três visões distintas sobre as responsabilidades sociais dos cientistas, sendo elas: a visão neutra, a visão cientificista e a visão crítico-interacionista. Estas visões se fizeram fundamentadas em diferentes modos de compreender a natureza da ciência e suas relações com a sociedade.

A primeira delas, guiada pela neutralidade, entendia que o principal objetivo do cientista seria produzir conhecimento puro, a partir de um método científico sólido e esvaziado de inferências externas. Notamos que esta visão satisfaz os movimentos pela liberdade científica citados anteriormente, uma vez

que as aplicações tecnológicas seriam apenas consequências do trabalho do cientista e suas responsabilidades se resumiriam à busca e ao compartilhamento de novos conhecimentos.

Entretanto, Verhoog (1981, p. 590) compreende que, para esta concepção, ciência não é considerada uma forma de atividade humana, mas "é, antes, separada de sua matriz social e compreendida exclusivamente como racionalidade científica". Ao criticar esta posição, o autor evidencia que a própria decisão de não cuidar para as implicações sociais de seu trabalho já constitui como uma escolha moral por parte do cientista.

Destaco aqui a compreensão de Bastos (1988), ao indicar que a aparente liberdade da ciência esconde um poderoso sistema de controle, que aplica a ideologia dominante mediante processos sutis, como o julgamento da relevância do trabalho científico. Neste sentido, o argumento de neutralidade atende a interesses específicos, que coloca a ciência a serviço daqueles que financiam e ditam as necessidades sociais, ao afastar o espectro político e questionador das motivações da prática científica.

Atualmente, no campo da epistemologia, é consenso que entender o desenvolvimento científico desvinculado de motivações pessoais e das demandas sociais configura-se como uma compreensão equivocada de ciência.

> Filósofos e sociólogos da ciência orientados para a história (por exemplo, Lakatos, 2008, Kuhn, 1962, Feyerabend, 2010; Ahtarieva et al., 2018; Ivygina et al., 2018) enfatizam o impressionante peso dos fatores psicológicos e sociais e das aspirações pessoais no desenvolvimento, verificação e seleção de dados científicos. (SAENKO et al., 2019, p. 334, tradução minha)

No que diz respeito à visão cientificista, Verhoog (1981) indica que esta não compreende que a ciência é desvinculada dos problemas sociais, mas que deve utilizá-los como ponto de partida, a fim de promover os princípios da racionalidade científica. portanto, investigações científicas empíricas seriam as únicas maneiras válidas de produzir conhecimento sobre o mundo (VERHOOG, 1981, p. 587).

> O cientificismo é a crença de que o conhecimento científico contém, por implicação, normas éticas para a conduta individual e a

> organização adequada da sociedade. Portanto, o conhecimento científico deve ser a fonte de julgamentos morais, e os cientistas, como mestres do conhecimento científico, são as fontes adequadas de autoridade moral e devem governar a sociedade. (VERHOOG, 1981, p. 595, tradução minha).

Para esta concepção, que se aproxima de concepções positivistas, a prática científica, a partir do empirismo, seria a única maneira válida de produzir conhecimento sobre o mundo, e este conhecimento seria hierarquicamente superior aos demais saberes disponíveis em uma sociedade.

> Esta imagem considera ciência como a única fonte de um conhecimento seguro. Tanto o método como o poder explicativo das teorias cientificas fazem delas a única fonte de um conhecimento objetivo e verdadeiro. Uma tal imagem é um sistema realmente idealístico, isto é, algo que não se baseia na realidade concreta. (DINIS, 1994, p. 128)

Nesta visão, o dever dos cientistas se resume em promover a maneira racional de pensar, além de fornecer um sistema de valores capaz de resolver dilemas inerentes da relação entre ciência e sociedade. Verhoog (1981) entende que, nesta concepção, a ética da pesquisa científica não seria um fundamento adequado para julgamentos morais externos à busca pelo conhecimento, dado ao conflito existente entre o avanço do conhecimento científico e as consequências das aplicações deste conhecimento.

Por fim, a visão crítico-interacionista compreende a ciência como uma atividade humana, e defende que a busca por novos conhecimentos não deve se distanciar de seu valor para a sociedade. Esta visão compreende que o conhecimento científico assume uma posição central tanto para a solução de demandas sociais, quanto para a fabricação de novos riscos e incertezas.

Dado o impacto da atividade científica na sociedade, Verhoog (1981, p. 589) alerta que esta atividade requer reflexão crítica sobre o sistema no qual é aplicada e sobre o propósito para o qual a ciência é usada. Para o autor, é responsabilidade social do cientista realizar estas discussões.

> A comunidade científica deve levar em consideração as regras morais de sua sociedade, inclusive sua lei, o que não implica a renúncia à autonomia da ciência. A reflexão sobre as implicações morais e sociais das consequências do conhecimento científico, incluindo o

> conhecimento que ele mesmo cria, deve ser incluída entre as obrigações de cada cientista. Deve tornar-se um elemento na ética da comunidade científica. (VERHOOG, 1981, p. 598, tradução minha)

Neste sentido, Bastos (1988, p. 77) advoga por substituir a idealização de um cientista distante dos problemas sociais, preocupado exclusivamente com a relevância de seu trabalho, por um cientista "atento aqueles problemas, critico quanto a sua origem e engajado, como cientista, em pesquisas relacionadas com os problemas sociais", ainda, compreende que "o imperativo da responsabilidade social exige do cientista uma consciência *crítica* e não *ingênua*, mesmo que se dedique à pesquisa considerada pura".

Durante a década de 90, novos aspectos foram sendo acrescidos aos debates sobre as reponsabilidades sociais dos cientistas, tais como: a necessidade de fazer com que os cientistas se sintam livres para se expressar frente ao público (BRUNNER e ASCHER, 1992), a crítica sobre a atitude mercenária de certos cientistas frente a necessidade de financiamento (DINIS, 1994), a necessidade em desenvolver um novo código de ética e inseri-lo na educação de novos pesquisadores (BROUWER, 1994) e a evidencia de um desequilíbrio "contra o progresso ético e moral, a favor do progresso científico e tecnológico" (CANDEIAS, 1999).

Ao analisar as RSC a partir da perspectiva da produção de riscos tecnológicos e sociais, Douglas (2003) evidencia duas categorias gerais sobre as consequências não intencionais do trabalho do cientista: a imprudência, como a aceitação de um risco irracional, e a negligência, como a falha em prever e prevenir tal risco. Ainda, para o autor, a distinção destas categorias reside no processo de pensamento do pesquisador, se este refletiu sobre possíveis consequências de seu trabalho e se houve algum reconhecimento de possíveis danos que poderiam surgir de sua ação.

> Quer sejamos negligentes ao considerar possíveis consequências ou imprudentes em nossa desconsideração por possíveis danos, seremos responsabilizados pelas consequências se nossas ações forem injustificáveis ou irracionais. (DOUGLAS, 2003, p. 63, tradução minha)

Herrlich (2013, p. 759) questionou se os cientistas têm maior responsabilidade de contribuir para a sociedade do que políticos, juízes,

jornalistas, ou qualquer outro cidadão. Para ele, a história pode “ensinar sobre como os cientistas devem lidar com pesquisas que têm o potencial de causar danos”.

Herrlich utiliza como exemplos cientistas que foram centrais para os processos de desenvolvimento científico de tecnologias bélicas, sendo eles: Fritz Haber, (1868-1934), que demonstrou como realizar a síntese do amoníaco, composto fundamental para a produção fertilizantes, porém, Harber também revolucionou os conflitos armados, com a produção de gases venenosos para o exército alemão durante a primeira guerra mundial; Wernher von Braun (1912-1977), responsável pelo desenvolvimento do foguete V-2, utilizado para bombardear Londres durante a segunda guerra mundial, posteriormente von Braun se tornaria uma das figuras centrais do programa espacial norte americano; Edward Teller (1908-2003), que trabalhou no PM para o desenvolvimento da bomba atômica, após a guerra Teller continuou as pesquisas nucleares no desenvolvimento da bomba termonuclear, ou bomba H; e, por fim, Andrei Sakharov, físico nuclear responsável pelo desenvolvimento da bomba termonuclear soviética, entretanto, a partir da década de 70 se tornou uma das principais figuras contra o desenvolvimento de armamentos nucleares. A partir dos exemplos citados, expõe três lições:

> Primeiro, um cientista conhecido e respeitado, ou um pequeno grupo de cientistas, pode exercer enorme influência na política e na sociedade. Em segundo lugar, é quase impossível manter um segredo de invenção, mesmo que tenha grande valor militar ou possa causar danos enormes. Terceiro, os cientistas, assim como a sociedade em geral, variam em seu comportamento. (HERRLICH, 2013, p. 760)

O autor argumenta ainda que “o público pode exigir regulamentos ou medidas legislativas para controlar ou mesmo proibir pesquisas que poderiam ser usadas para causar danos” (HERRLICH, 2013, p. 763). No entanto, ele conclui que a conscientização dos cientistas acerca das possibilidades de utilizações adversas de suas invenções, é a única maneira de alcançar o desenvolvimento.

Recentemente, ao analisar um conjunto de 263 artigos, publicados a partir da década de 60, Glerup e Horst (2014) identificaram quatro maneiras de

pensar as RSC, distintas pelo direcionamento das pesquisas e pelo modo de regulamentação do trabalho do cientista. Sendo elas:

> ...a racionalidade da demarcação, que visa excluir o social da produção científica para torná-la objetiva e, assim, responsável; a racionalidade da reflexividade, que vê como responsabilidade da ciência deixar-se guiar pelos problemas da sociedade na escolha de objetivos e métodos de pesquisa; a racionalidade da Contribuição, que insiste que a ciência responsável deve atender às demandas públicas por inovação e democracia; e a racionalidade da Integração, que defende que a ciência deve ser co-construída com atores sociais para ser socialmente responsável. (GLERUP E HORST, 2014, p. 31)

No que se refere ao papel da moral e da ética para cada uma das visões, notamos que as racionalidades de Demarcação e Reflexividade percebem a ciência como uma instituição fundamentalmente “boa”, com capacidade de servir da melhor maneira a sociedade. Por outro lado, as racionalidades de Contribuição e Integração reconhecem a sociedade como uma fonte de conhecimento moral, da qual a ciência precisa extrair seus valores (GLERUP E HORST, 2014).

As autoras entendem não haver uma delimitação clara entre as racionalidades, uma vez que todas enfatizam a necessidade de regular a relação entre ciência e sociedade. Desta maneira, definir a fronteira entre ciência e sociedade se constitui como um problema compartilhado entre as quatro racionalidades identificadas.

Kobylarek (2019) argumenta que não reconhecer as responsabilidades sociais dos cientistas pode levar à perda de prestígio social e afetar o exercício da prática científica. Ao se referir às atitudes dos cientistas, o autor destaca o cuidado em se comunicar com a comunidade, de modo a evitar afirmações infundadas ao invadir áreas das quais não possui domínio, porém, é dever das instituições garantir a criação, verificação e disseminação do saber.

Portanto, neste segundo período de discussões, que resulta nas concepções atuais sobre as RSC, podem ser notadas manifestações sobre a maneira pela qual os próprios cientistas pensam seu trabalho e as possíveis relações entre ciência e sociedade.

Cabe destaca também que os desenvolvimentos no campo da filosofia da ciência trouxeram novas interpretações para a ética do trabalho do cientista,

de modo que a compreensão de ciência como uma atividade humana, influenciada por fatores políticos e econômicos e capaz de desencadear profundas transformações sociais, tanto para a produção de riscos quanto para a melhoria na qualidade de vida, indica a necessidade de pensar as RSC, afim de garantir o livre exercício da pesquisa acadêmica sem se afastar de seu valor social.

Entretanto, há divergências quanto a definição e fundamentação de tais responsabilidades. No tópico seguinte, apresentarei diferentes interpretações sobre o conceito, com intuito de evidenciar quais são as RSC reconhecidas para esta pesquisa.

2.4 Conceito, fundamentos e caracterização das responsabilidades sociais dos cientistas

De maneira ampla, o termo responsabilidade refere-se à obrigatoriedade de responder pelos próprios atos ou por aqueles praticados por pessoas confiadas[92], ainda, corresponde a obrigação moral, jurídica ou profissional pelo cumprimento de determinadas leis, atribuições ou funções[93].

Na ciência não é fácil conceituar o termo responsabilidade, uma vez que não há consenso quanto a definição da RSC. Ao criticar a imposição destas responsabilidades, Bridgman (1948) reconheceu dois significados distintos: a) responsabilidade em um sentido causal, por ter tornado possível certas mudanças sociais; e b) responsabilidade como obrigação moral, decorrente da própria natureza da profissão.

Ao avaliar o termo responsabilidade a partir da filosofia do direito, HART (2008, p. 212) identificou quatro diferentes sentidos gerados por expressões como ‘responsabilidade’, ‘responsável’ e ‘responsável por’, definidos como: tarefa, capacidade, causa e ônus.

Responsabilidade como tarefa refere-se aos casos nos quais o sujeito ocupa “um lugar ou cargo distinto em uma organização social, ao qual estão ligados deveres específicos” (HART, 2008, p. 212), ainda, acrescenta-se responsabilidades decorrentes de posições de autoridade. O autor indica que,

[92] https://www.dicio.com.br/responsabilidade/
[93] https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/responsabilidade/

nestes casos, a pessoa responsável é aquela capaz de reconhecer seus deveres e empregar grande esforço para cumpri-los.

Por outro lado, a responsabilidade como capacidade representa situações nas quais o indivíduo tem a possibilidade de avaliar o contexto e tomar decisões a partir de sua disposição intelectual ou material. De acordo com o autor:

> As capacidades em questão são as de compreensão, raciocínio e controle da conduta: a capacidade de entender qual conduta as regras legais ou a moralidade exigem, de deliberar e tomar decisões sobre esses requisitos e de se conformar com as decisões quando tomadas. (HART, 2008, p. 227, tradução minha).

Responsabilidade como causa diz respeito as situações nas quais determinadas ações, omissões, condições ou eventos geram consequências que afetam seu entorno. Deste modo, o significado do termo está diretamente relacionado com o entendimento de que algo ‘causou’ ou ‘produziu’ determinado efeito.

Por fim, responsabilidade como ônus está vinculada às questões políticas, morais e legais por uma dada maneira de comportamento. Neste sentido, a responsabilidade é observada a partir de leis e padrões morais vigentes em uma determinada sociedade, na qual ações que colocam em risco sua segurança são vistas como irresponsáveis e passíveis de punições legais.

A partir das considerações de Hart, Schuurbiers (2011) substitui a compreensão da responsabilidade como causa pela responsabilidade como atitude, ao inserir elementos de criticidade ao saber produzido pelo cientista, esta concepção como atitude “diz respeito à disposição de basear a decisão de seguir ou não uma regra no exame crítico dessa regra à luz de seus significados e intenções”. A partir dos diferentes significados, Schuurbiers descreve as RSC da seguinte maneira:

> Os pesquisadores são responsáveis (no sentido de ter a tarefa) pelo avanço do conhecimento científico. Em virtude de sua contribuição para o avanço do conhecimento, eles são até certo ponto responsáveis (no sentido causal) pelas consequências socioéticas de suas pesquisas, o que implica que eles são responsáveis (no sentido do ônus) por suas ações quanto aos impactos de seu trabalho na sociedade e, portanto, têm a responsabilidade (no sentido de

> atitude/virtude) de refletir criticamente sobre o contexto sócio-ético de seu trabalho. (SCHUURBIERS, 2010 p. 42, tradução minha)

De modo a compreender a responsabilidade como um conceito político, ou seja, aberto a contestação de como deve ser definido e interpretado, Glerup e Horst (2014) indicam que não há um acordo sobre o que é ou deveria ser a responsabilidade social da ciência, ainda, para cada interpretação há consequências distintas na maneira como a ciência é regulamentada e praticada.

> Nossa análise demonstra que uma definição particular de responsabilidade também implica uma compreensão particular da conduta própria da ciência, sustentando a descrição de algumas formas de prática como responsáveis e outras como irresponsáveis. (GLERUP e HORST, 2014, p. 44, tradução minha)

Perante isso, utilizarei uma definição que compreende o trabalho científico como uma atividade humana, capaz de modificar e ser modificada pelo contexto social no qual é praticada. Desta maneira, as discussões sobre as responsabilidades sociais dos cientistas se estabelecem como uma crítica a uma visão neutra ou cientificista da ciência, tal qual evidenciado no tópico anterior.

Como exposto por Bastos (1988, p. 77), a RSC pode ser definida pela "postura de compromisso do cientista com as necessidades da sociedade, do país e, consequentemente, pela preocupação com o uso e destino dos conhecimentos que produz".

Tendo sido justificada e definida a partir de discussões históricas, se faz necessário pensar quais são, de fato, as responsabilidades sociais dos cientistas. Para tanto, é preciso esclarecer sob quais princípios estas responsabilidades devem ser pensadas, dada a própria natureza e dinâmica do trabalho científico. Neste sentido, Verhoog (1981) compreende que as responsabilidades devem ser pensadas a partir de critérios éticos.

> Esses critérios éticos são as bases das escolhas entre possibilidades alternativas de ação após uma avaliação criteriosa dos prós e contras de cada uma. A atividade científica está sujeita a julgamentos éticos, ou seja, julgamentos de acordo com critérios éticos, como qualquer outra ação humana. (VERHOOG, 1981, p. 582, tradução minha)

Na perspectiva de Evers (2001, p. 89), estes critérios éticos são baseados em valores sociais relevantes para a vida cotidiana, como por exemplo “honestidade, ceticismo, justiça, colegialidade, veracidade, precisão, consciência e respeito”. Isto implica que os critérios éticos devem promover as responsabilidades dos cientistas sem ferir os valores sociais da comunidade.

Douglas (2003) entende que os princípios das RSC devem ser observados a partir de diferentes dimensões da prática científica, seja a dimensão epistémica, que visa a produção de novos conhecimentos, ou a dimensão prática, que visa aplicação do conhecimento para o desenvolvimento tecnológico. O autor ainda alerta para a necessidade de distinguir as responsabilidades associadas a atribuições do cientista como profissional e como cidadão, afim de que não se confundam as responsabilidades gerais de um cidadão enquanto parte de um grupo social e as responsabilidades derivadas das funções do cientista como produtor de conhecimento.

Hansen (2006, p. 73) indica que as os critérios éticos e as responsabilidades dos cientistas interagem de três modos distintos, são eles:

> (i) normativo, no qual os princípios éticos básicos e as responsabilidades do cientista são estabelecidas, discutidas e justificadas; (ii) individual, onde os princípios éticos são traduzidos em ações responsáveis de cientistas e engenheiros [...]; e (iii) estrutural ou contextual, onde as instituições e mecanismos sociais que cercam os cientistas e engenheiros individuais são abordados, já que essas instituições às vezes falham em prevenir os dilemas éticos que cientistas e engenheiros podem encontrar em suas vidas profissionais. (HANSEN, 2006, p. 73, tradução minha).

Afim de compreender estes fatores, o autor estabelece um modelo analítico da interação entre: a) Valores e princípios ideais; b) mecanismos socais e instituições; e c) responsabilidade individual. De acordo com o autor, este modelo:

> enfatiza uma dialética entre as responsabilidades dos indivíduos e as instituições e mecanismos sociais circundantes, que novamente é – ou pelo menos deveria ser – influenciado e co-formado por valores e princípios éticos ideais. (HANSEN, 2006, p. 73, tradução minha).

De acordo com Roos e Hoffart (2021, p.132), estas reflexões demonstram características sobre as RSC. Primeiro, o objetivo dos

pesquisadores deve ser avaliado como um possível ponto de partida para os critérios das RSC. Segundo, existem diferentes tipos de responsabilidades, vinculadas ao exercício de diferentes funções, seja o cientista como profissional ou como cidadão. E por fim, as responsabilidades podem ser direcionadas tanto ao indivíduo quanto à comunidade científica.

Hansen (2006, p. 88) conclui haver duas esferas que regem as responsabilidades dos cientistas: as responsabilidades acadêmicas e as responsabilidades sociais.

A primeira é atrelada ao dever de produzir “conhecimento científico crível e transparente que não seja distorcido por interesses externos”, de maneira a seguir um código de ética guiado para a boa conduta no exercício de suas atribuições, ainda, cabe ao cientista reconhecer os limites deste código. Tais responsabilidades estão vinculadas a posição dos cientistas como atribuição profissional, e dizem respeito a condução de uma pesquisa confiável e segura. O quadro abaixo descreve estas responsabilidades.

Quadro 3 – Responsabilidades acadêmicas dos cientistas

<table>
<tr><th>Responsabilidades</th><th colspan="2">Atitudes para a prática científica</th></tr>
<tr><td rowspan="7">Conduzir pesquisas confiáveis</td><td colspan="2">Ser Honesto (não deturpar dados)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Ter cuidado (minimizar erros)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Evitar conflitos de interesses</td></tr>
<tr><td colspan="2">Compartilhar dados, métodos e resultados</td></tr>
<tr><td colspan="2">Obedecer à lei e aos padrões morais</td></tr>
<tr><td colspan="2">Se comportar de maneira justa e respeitosa</td></tr>
<tr><td colspan="2">Usar eficientemente os recursos destinados à pesquisa</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Educar e ensinar futuros cientistas</td><td colspan="2">Ensinar a totalidade de sua disciplina (com variedade e profundidade)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Refletir sobre filosofia da ciência, e sobre as metodologias aplicadas</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Participar em discussões acadêmicas</td><td rowspan="3">Sobre a própria pesquisa</td><td>Ter abertura intra e interdisciplinar</td></tr>
<tr><td>Responder às críticas</td></tr>
<tr><td>Refletir sobre métodos, normatividade e filosofia da ciência</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sobre a pesquisa de terceiros</td><td>Fornecer feedback e realizar revisões</td></tr>
<tr><td>Manter consciência geral e interesse em diversos campos do conhecimento</td></tr>
</table>

Fonte: Roos e Hoffart (2021)

Por fim, as Responsabilidades Sociais derivam da concepção de ciência como uma atividade humana, socialmente inserida. Estas responsabilidades estão relacionadas a implicações práticas da pesquisa, e são pensadas a partir da interação entre os saberes produzidos pelos cientistas e as possíveis consequências sociais. O quadro 4 esclarece tais responsabilidades, em termos de: a) pensar as possíveis consequências do trabalho empreendido; b) escutar e buscar responder as demandas sociais; e c) esclarecer os trabalhos que estão sendo realizados ao público e aos indivíduos.

Quadro 4 – Responsabilidades sociais dos cientistas

Responsabilidades	Atitudes para a prática científica
Cuidar pelas consequências da pesquisa	Combater o possível uso indevido e a má interpretação da pesquisa
	Refletir sobre as limitações e os impactos previsíveis de seu trabalho
	Refletir e discutir sobre uma aplicação adequada, de maneira a abordar questões sociais
Buscar relevância na ciência e conduzir pesquisas socialmente valiosas	Pesquisar sobre temas urgentes e relevantes
	Manter o foco na utilidade e aplicabilidade do conhecimento
Comunicar e aconselhar o público e os governos	Comunicar o público e os governantes
	Prestar assessoria para políticas públicas

Fonte: Roos e Hofart (2021)

Cabe destacar ainda que, neste sentido, o imperativo da responsabilidade social não é balizado pelas atribuições legais dos pesquisadores, mas pela atitude voltada à prática de uma ciência socialmente responsável baseada em critérios éticos e morais. Portanto, a liberdade científica se resguarda frente ao posicionamento dos cientistas em cuidar das implicações do conhecimento, uma vez que tal código de comportamento é produzido pela própria comunidade de pesquisadores.

Deste modo, pensamos que compete aos cientistas, bem como a todos nós, questionar constantemente acerca do uso que se faz da ciência, em especial, dos resultados obtidos da atividade científica. O exemplo histórico do

uso de armas nucleares mostra que as consequências do uso delas não ficaram restritas aos alvos militares, como bem explicitou o físico Samuel MacDowell.

> Em todas as épocas da história da humanidade, grupos sociais utilizaram seus conhecimentos e compreensão de fenômenos naturais com fins militares, para a construção de poderosas armas de guerra e artefatos de destruição. Entretanto, a descoberta dos armamentos nucleares introduz uma mudança qualitativa no equacionamento do problema da convivência entre nações e da resolução de conflitos pelas armas. Isto porque, mesmo que o uso de bombas nucleares seja dirigido a alvos militares, as consequências de explosões nucleares estendem-se muito além do local do alvo e por muito tempo após a explosão, de modo a causar severos e irreparáveis danos à população civil e ao meio ambiente. Por outro lado, o uso maciço de explosivos nucleares, por uma ou mais das grandes potências, quaisquer que sejam os objetivos, terá consequências tão funestas e catastróficas para a humanidade que sua própria sobrevivência ficará ameaçada. Diante desta realidade, os cientistas do mundo inteiro não se podem furtar à responsabilidade de assumir posições firmes e definidas contra quaisquer tentativas de expansão da corrida armamentista e a favor de medidas que conduzam a uma redução dos arsenais nucleares e da ameaça de uma conflagração nuclear. Devemos empenhar nossos esforços no sentido de que sejam banidos, por consenso universal, o uso, a fabricação e o armazenamento de armas nucleares, assim como já foi banido, por comum acordo entre as nações, o uso da guerra bacteriológica. Instituições especificamente científicas, que se mantiveram no passado à margem do debate político, diante da nova situação criada pela assustadora acumulação de armas nucleares, já se inclinam a tomar posições com respeito a decisões políticas relativas à promoção de pesquisas científicas com objetivos militares, particularmente com referência a armamentos nucleares. (MACDOWELL, 1988, p. 71).

Embora as argumentações dos autores citados digam respeito a acontecimentos de um período específico, em que as discussões acerca das armas nuclear estavam muito efervescentes, julgamos que elas continuam sendo válidas para os dias atuais. Neste sentido, concordamos com a sugestão de MacDowell para empenharmos esforços para banir a fabricação, o

armazenamento e o uso de armas nucleares, bem como de qualquer arma de destruição em massa, sejam elas nucleares, químicas e/ou biológicas.

Entendemos como uma possibilidade de contribuição, enquanto físicos educadores, levarmos esse debate para o contexto escolar. Argumentamos a favor de uma Educação Científica não fragmentada e desenvolvida mediante uma visão de mundo e da vida humana, o que pode ocorrer por meio da introdução de discussões sobre Ética e Responsabilidade Social dos Cientistas, com o estudo de episódios históricos como, por exemplo, o Projeto Manhattan. Neste sentido, consideramos apropriado considerar como referencial teórico os aportes e contribuições trazidas por autores que refletem e estudam sobre a responsabilidade social dos cientistas, como é o caso daqueles citados nesta seção.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo, apresento elementos referentes ao desenvolvimento da pesquisa, para tanto, descrevo o tipo de investigação, o objetivo do trabalho e os problemas abordados. Apresento também os processos metodológicos utilizados para alcançar estes objetivos, a partir de uma breve descrição do objeto analisado e das categorias de análise.

3.1 Questões, objetivo e natureza da pesquisa

A partir da narrativa histórica evidenciada no primeiro capítulo, observa-se que o PM se refere ao episódio histórico destinado à produção de novos conhecimentos e tecnologias bélicas, modificando os modos de pensar o trabalho científico. Portanto, discutir o PM permite, além de trabalhar todo o conteúdo relacionado à Física Nuclear, discutir elementos da natureza do trabalho cientifico e as relações entre ciência e sociedade, de um modo historicamente contextualizado.

Por sua vez, as RSC remetem a discussões que buscam estabelecer parâmetros éticos para a pesquisa científica, a partir da compreensão da ciência como uma atividade humana, permeada por fatores sociais, políticos e econômicos, e que possui um alto valor transformador no que tange as esferas culturais e tecnológicas. Assim, estudar aspectos relacionados às RSC implica estudar sobre a natureza do trabalho científico e as relações entre ciência e sociedade.

Desta maneira, esta pesquisa tem como objetivo **refletir acerca da presença de referências à Responsabilidade Social dos Cientistas em manuais escolares destinados ao ensino de Ciências/Física, especificamente quando do tratamento de conteúdos relacionados ao "Projeto Manhattan"**.

Perante isso, busquei responder ao seguinte problema: **Como as apresentações sobre o "Projeto Manhattan", veiculadas em manuais escolares dirigidos ao ensino de Física, permitem discutir as Responsabilidades Sociais dos Cientistas?**

Como questões norteadoras, avalio relevante responder as seguintes:

Questão 1: De que maneiras o Projeto Manhattan é inserido nos manuais escolares de Física, destinados ao Ensino Médio, relativamente à utilização de elementos de HFSC?

Questão 2: Que aspectos das “Responsabilidades Sociais dos cientistas” são possíveis identificar nos manuais que contemplam discussões acerca do Projeto Manhattan?

Para tanto, proponho a realização de uma pesquisa de abordagem qualitativa, tendo em vista que a principal preocupação está na compreensão dos modos como as RSC são tratadas em manuais escolares de física, a partir de um determinado episódio histórico, dispensando resultados quantificados e cálculos estatísticos. De acordo com Flick:

> “Os aspectos essenciais da pesquisa qualitativa consistem na escolha adequada de métodos e teorias convenientes; no reconhecimento e na análise de diferentes perspectivas; nas reflexões dos pesquisadores a respeito de suas pesquisas como parte do processo de produção de conhecimento; e na variedade de abordagens e métodos. (FLICK, 2004, p. 20).

Em uma pesquisa qualitativa, os dados coletados não devem ser resumidos em variáveis, mas avaliados com atenção especial ao contexto ao qual estão inseridos (GODOY, 1995b). Neste tipo de pesquisa, busca-se descrever as características fundamentais do elemento que se pretende investigar, a fim de estabelecer relações entre os objetos de estudo e o quadro teórico, os quais nestes trabalhos são compreendidos como os manuais escolares e as RSC, respectivamente.

Dentre os diversos tipos de pesquisas classificadas como qualitativas, tais como os estudos de caso e a etnografia, entendo minha pesquisa como documental, já que o objetivo é olhar para os manuais escolares de maneira a observar a inclusão da RSC.

> ...pesquisa documental é aquela em que os dados obtidos são estritamente provenientes de documentos, com o objetivo de extrair informações neles contidas, a fim de compreender um fenômeno; é um procedimento que se utiliza de métodos e técnicas para a apreensão, compreensão e análise de documentos dos mais variados

> tipos; é caracterizada como documental quando essa for a única abordagem qualitativa, sendo usada como método autônomo. (KRIPKA et al., 2015, p. 58).

Por sua vez, a definição do termo “documento” tem sofrido diversas modificações. Inicialmente, compreendido como material escrito e de origem oficial, buscava representar a objetividade da ciência social a partir de concepções positivistas, entretanto, com o desenvolvimento das pesquisas sociais e das teorias do conhecimento, o termo documento obteve um significado mais amplo, de maneira a incluir materiais de natureza diversa, tais como os registros audiovisuais e impressos.

Appolinário (2009, 67, *apud* SÁ-SILVA et al., 2009, p. 8) compreende que o termo deve ser definido como “qualquer suporte que contenha informação registrada, formando uma unidade, que possa servir para consulta, estudo ou prova”, de maneira a corroborar com a definição fornecida pelo Arquivo Nacional como uma “unidade de registro de informações, qualquer que seja o suporte ou formato” (2005, p. 73)

Os documentos possuem grande importância para as diversas áreas da ciência, visto que além de informações sensíveis, uma vez que produzidos em um determinado contexto histórico, econômico e social, fornecem também informações sobre seu contexto de produção (GODOY, 1995a).

> Os documentos, enquanto elementos de pesquisa, são muito importantes, pois revelam-se como fontes ricas e estáveis, podem ser consultados várias vezes, servem de base a diferentes estudos, fundamentam afirmações do pesquisador, além de complementar informações obtidas por meio de outras técnicas. (LUDWIG, 2003, p. 13).

Parte fundamental de uma pesquisa documental se caracteriza pela escolha do tipo de documentos que serão analisados. Esta escolha dependerá tanto dos objetivos e do problema a que se busca uma resposta, quanto dos propósitos, ideias ou hipóteses pertencentes à pesquisa.

Assim, podemos classificar os documentos de maneiras distintas, com intuito de melhor compreender a unidade que será utilizada para análise. Inicialmente, os documentos podem ser classificados como primários, os quais ainda não foram submetidos para análise e que foram produzidos dentro do

contexto do fenômeno analisado, ou secundários, os quais já receberam algum tratamento analítico.

Gil (2008) descreve diferentes fontes de documentação, entre elas: a) Registros estatísticos, responsáveis pelo armazenamento de uma grande quantidade de dados referentes ao fenômeno pesquisado; b) Registros institucionais escritos: produzidos por instituições governamentais, tais como projetos de lei e relatórios de órgãos governamentais; c) Documentos pessoais: produzidos por iniciativa do próprio autor, são documentos que possibilitam acesso e a informações importantes sobre a experiência pessoal ; e, por fim, d) Comunicação de massa: documentos voltados a circulação de informações entre o grande público.

Escolhi como unidade de análise as obras pertencentes ao Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) que, dado sua relevância para o sistema educacional em território nacional, caracterizam-se como documentos de comunicação em massa.

Ainda, em uma pesquisa documental, após estabelecer o tipo de unidade de análise, faz-se necessário reconhecer também as particularidades intrínsecas à natureza dessas fontes, uma vez que, enquanto documentos produzidos dentro de um determinado contexto, estes materiais possuem motivações e objetivos específicos, que devem ser levados em consideração afim de evitar anacronismos e distorções enviesadas.

Neste sentido, Flick (2004, p. 259) aponta que os documentos “representam uma versão de realidades construídas para objetivos específicos”. Portanto, os documentos devem ser vistos como um modo de contextualizar os dados, e não como “contêineres de informações”. Para tanto, pesquisadores que utilizam da pesquisa documental devem considerar, além do conteúdo, o contexto, o modo de utilização e os objetivos de produção dos documentos selecionados.

A seguir, apresentarei as etapas de efetivação da pesquisa, tal como a caracterização das fontes selecionadas e a explicação dos procedimentos analíticos empregados.

3.2 Desenvolvimento da pesquisa

Neste tópico, apresento os caminhos que segui para a realização da pesquisa, ainda, abordo os procedimentos e as categorias aplicadas para a realização da análise do texto das coleções didáticas selecionadas.

3.2.1 Aprofundamento teórico e construção das categorias de análise

Nesta primeira etapa, tive como objetivo aprofundar meus conhecimentos acerca dos elementos teóricos que permeiam o trabalho, sendo eles: o processo histórico responsável pelo desenvolvimento dos armamentos nucleares, denominado Projeto Manhattan, tido como episódio histórico capaz de suscitar discussões acerca das responsabilidades dos cientistas; e os elementos que fundamentam e definem as responsabilidades sociais dos cientistas, que compreende o referencial teórico da pesquisa.

Inicialmente, realizei uma busca por artigos científicos e livros que discutissem a história do Projeto Manhattan de modo a evitar possíveis anacronismos ou concepções equivocadas sobre o desenvolvimento histórico e científico do episódio. Este momento se fez importante afim de superar narrativas pseudo-históricas ou reduzidas do episódio, de modo a evidenciar complexidades capazes de enriquecer debates acerca da prática científica. Os resultados desta primeira pesquisa foram apresentados no Capítulo 1, e configura um trabalho historiográfico sobre o tema.

Em um segundo momento, busquei por trabalhos que expressassem a opinião de cientistas sobre as RSC, com atenção especial àqueles que participaram do PM, afim de compreender de que modo o episódio impactou no entendimento desses cientistas acerca do tema. Esta etapa teve como objetivo apresentar a fundamentação teórica das RSC. A partir deste estudo teórico, apresentei uma abordagem histórica sobre as principais características que marcaram as discussões acadêmicas acerca das RSC (capítulo 2).

Como resultado desta etapa, no quadro 5 são apresentadas descrições de diferentes dimensões destas responsabilidades, as quais serão utilizadas como categorias de análise, com intuito de guiar as interpretações e evitar possíveis descolamentos dos resultados para as questões de pesquisa. Assim,

destaco que o capítulo 2, além de levantamento acerca das concepções sobre o tema, se constitui como o processo de construção das categorias de análise.

Quadro 5 – Categorias de análise das RSC

N° de ordem	Categoria	Definição
1	Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	Associada a implicações sociais do conhecimento científico. O cientista, no decorrer de sua pesquisa, deve refletir sobre o modo como essa poderá ser apropriada pelo público, com intuito de identificar possíveis aplicações indevidas e impactos previsíveis de seu trabalho
2	Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	Associada a compreensão da ciência como um produto social. Evidencia a necessidade de buscar temas atuais, buscando a solução de problemas sociais com base na aplicabilidade do conhecimento produzido
3	Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos	Associada a posição do cientista como especialista e produtor de conhecimento. O cientista deve manter um diálogo constante com diferentes esferas sociais, com intuito de tornar o conhecimento público e acessível.

Fonte: autoria própria.

A primeira categoria se fundamenta nas *implicações das pesquisas científicas às diversas esferas sociais*, sejam elas políticas, econômicas ou tecnológicas. Neste sentido, entende-se que o conhecimento científico possui uma grande capacidade de transformação social, podendo ser aplicada tanto para a melhoria da qualidade de vida de uma população quanto para a produção de meios violentos de dominação. Neste contexto, os pesquisadores têm a responsabilidade de refletir acerca dos possíveis impactos dos trabalhos desempenhados, afim de se constituir como um primeiro impedimento às apropriações indevidas do conhecimento produzido.

A segunda categoria busca refletir sobre as motivações dos pesquisadores ao optar por uma determinada linha de pesquisa. Esta categoria fundamenta-se na *não-neutralidade da ciência*, e reconhece a existência de fatores complexos que incentivam determinadas pesquisa em detrimento de outras, como o interesse financeiro, a busca por prestígio social e a disposição de oportunidades aos pesquisadores. Por outro lado, a ciência, como empreendimento social, deve objetivar atender as demandas vigentes de toda a população, e não apenas das classes dominantes. Tais reflexões permitem perceber a pesquisa cientifica como uma atividade social, influenciada por

fatores políticos e econômicos, em oposição a concepção de ciência movida apenas pela curiosidade desinteressada por novos conhecimentos.

Por fim, a terceira categoria compreende a *importância da comunidade acadêmica na educação científica*, afim de produzir uma sociedade participativa, que seja capaz de refletir acerca do processo de produção do conhecimento e direcionar suas demandas. Ainda, esta categoria aponta para a necessidade de os cientistas aconselharem os indivíduos responsáveis pela tomada de decisão, tendo em vista a posição de autoridade da sociedade acadêmica em assuntos que dizem respeito a aplicação do saber produzido.

3.2.2 Análise Preliminar das coleções didáticas

Nesta segunda etapa, apresento o processo de compreensão acerca do contexto de produção das fontes analisadas. Por se tratar de uma pesquisa documental, esta etapa é fundamental no sentido de caracterizar a natureza das fontes que serão utilizadas, tal como o objetivo para o qual foram produzidas. Em seguida, descrevo o primeiro contato com os livros selecionados para análise.

3.2.2.1 Conhecendo o Programa Nacional do Livro e do Material Didático

O Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) integra as ações do governo federal voltadas a distribuição de coleções didáticas e materiais de apoio educacional, destinados aos alunos e professores de escolas públicas em todo o território nacional. O programa atualmente é mantido pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) e é administrado pelo Ministério da Educação (MEC).

O PNLD decorre de uma série de políticas com início no ano de 1937, a partir da publicação do Decreto-Lei Nº 93, o qual concebia o Instituto Nacional do Livro (INL), com diversos objetivos, dentre eles: a) organizar e publicar a Enciclopédia Nacional; b) aumentar, melhorar e baratear a edição de livros no país; e c) incentivar a organização e auxiliar a manutenção de bibliotecas públicas (BRASIL, 1937).

No ano seguinte, com a publicação do Decreto-Lei nº 1.006, de 30 de dezembro de 1938, foi então instituída a Comissão Nacional do Livro Didático

(CNLD), com objetivo de estabelecer condições de produção, importação e utilização do livro didático. Deste modo, a CNLD se constitui como a primeira política voltada ao controle de coleções didáticas em território nacional.

Anos após, em 1971, o INL inicia o Programa do Livro Didático para o Ensino Fundamental (PLIDEF) que, com a publicação do decreto nº 91.542 em 1985, dá lugar ao PNLD, com uma série de modificações importantes, dentre elas: 1) Indicação do livro didático pelos professores; 2) Reutilização do livro, implicando a abolição do livro descartável; 3) Extensão da oferta aos alunos de 1ª e 2ª série das escolas públicas e comunitárias; 4) Fim da participação financeira dos estados, garantindo o critério de escolha do livro pelos professores (FNDE, 2017).

Foi apenas em 2003 que o Ensino Médio passou a receber obras didáticas, a partir da Resolução CD FNDE nº 38, a qual instituía o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM). Entretanto, a distribuição de livros para essa etapa escolar seguiu a partir de um plano progressivo, de modo que entre os anos de 2004 e 2007, foram distribuídos apenas livros de Matemática, Português e Biologia. Os livros de Física foram incluídos no edital de 2008, tendo disponibilizado, no ano de 2009, seis coleções de física, das quais três eram em volume único e três eram divididas em três volumes.

Ao orientar a escolha das obras, o catálogo do PNLEM de 2008 apontava para a necessidade de adequação à realidade das escolas e ao cotidiano dos alunos, para tanto, fora fundamental reforçar a autonomia dos professores durante o processo de escolha das obras utilizadas em sala. De acordo com Rangel (2005), é fundamental que este princípio da autonomia da escolha de livros pelas equipes docentes seja mantido, de modo que se trate de uma escolha fundamentada, autônoma e consciente. Ainda de acordo com o guia, as coleções deveriam:

> (i) favorecer a ampliação dos conhecimentos adquiridos ao longo do ensino fundamental; (ii) oferecer informações capazes de contribuir para a inserção dos alunos no mercado de trabalho, o que implica a capacidade de buscar novos conhecimentos de forma autônoma e reflexiva; e (iii) oferecer informações atualizadas, de forma a apoiar a formação continuada dos professores, na maioria das vezes

> impossibilitados, pela demanda de trabalho, de atualizar-se em sua área específica. (p. 17)

Para o período de 2012-2015, o PNLEM sofreu modificações quanto ao processo de avaliação das obras, sendo integrado ao PNLD. Neste ano, foram aprovadas 10 (dez) coleções de Física, todas compostas por 3 (três) volumes. Na sequência, para o período de 2015-2018, foram aprovadas 14 (quatorze) coleções, também compostas por 3 (três) volumes cada. Por sua vez, para o período de 2018-2021, foram aprovadas 12 (doze) coleções compostas por 3 (três) volumes.

Durante este período, houve um aumento na quantidade de coleções aprovadas, acompanhado de modificações no que diz respeito ao processo de avaliação e abrangência do programa. Entretanto, alguns critérios tomados para validação das obras se mostraram frequentes, tais como: a) Propõe discussões sobre as relações entre Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente; b) Utiliza abordagens do processo de construção das teorias físicas; c) Apresenta arranjos experimentais realizáveis em ambientes escolares típicos e alinhados com uma perspectiva investigativa; e d) Apresenta os conteúdos conceituais da Física sempre acompanhados ou partindo de sua necessária contextualização (BRASIL, 2017).

Ainda, destaca-se a importância dos tópicos relacionados à Física Moderna e Contemporânea, como visto no critério a seguir:

> Trata de forma adequada e pertinente, considerando os diversos estudos presentes na literatura atual da área, tópicos usualmente classificados como de Física Moderna e Contemporânea e que sejam considerados importantes ou mesmo imprescindíveis para o exercício da cidadania ativa, crítica e transformadora, bem como para a inserção ativa, crítica e transformadora no mundo do trabalho. (BRASIL, 2017b, p. 20).

Compreendo que estes critérios, aplicados durante o processo de avaliação do PNLD, demonstram preocupação em evitar a distribuição de obras estritamente conceituais, que estejam desvinculadas da realidade na qual serão utilizadas ou que priorizem o conteúdo conceitual em detrimento de temas como a história, filosofia, sociologia e natureza da ciência. Portanto,

Estes critérios incentivam a inserção de tópicos relacionados à HFSC, dos quais podemos destacar as Responsabilidades Sociais dos Cientistas.

Cabe ainda destacar a importância do PNLD no que se refere ao incentivo à leitura para o contexto educacional brasileiro, visto que se constitui como uma política de distribuição universal e gratuita de materiais escolares para todas as disciplinas, medida esta que impacta a realidade de milhares de escolas em todo o território nacional, uma vez que “muitas vezes pode se configurar no único meio acessível a informações e conhecimentos científicos aos educandos das redes públicas e suas famílias” (ROSA, 2017, p. 146).

Rosa (2017) evidencia ainda que o PNLD constitui um programa complexo, que é alvo tanto de pressões financeiras, devido ao interesse das editoras aos valores significativos que são investidos na compra e distribuição dos livros, quanto de pressões culturais, uma vez que, além de conhecimentos científicos, o livro didático propaga também valores ideológicos. Entretanto, a autora afirma que o programa tem contribuído positivamente para a inserção de temas contemporâneos nas obras.

> Atualmente os materiais didáticos possuem uma qualidade muito maior em relação às décadas passadas e isso, em grande parte, se deve aos editais do PNLD que passam a exigir uma melhor qualidade das coleções, em sintonia com os avanços das pesquisas educacionais em cada área disciplinar, bem como ao esforço (de certo modo compulsório) das editoras em reformular suas obras, visando atender melhor a estas demandas sobre o que seriam bons materiais didáticos. (ROSA, 2017, p. 135)

Tendo em vista a eminente relevância do PNLD e a necessidade de pensar coleções em observância ao contexto da pesquisa educacional brasileira, consideramos fundamentais pesquisas que buscam analisar os conhecimentos presentes nestas obras, afim de contribuir para as discussões acerca da produção de materiais educacionais que, através da inserção de temas voltados à HFSC e aspectos éticos da prática científica, sejam capazes de proporcionar uma concepção do fazer científico como uma atividade humana e socialmente inserida.

Levando em conta o objetivo de minha pesquisa e a importância do PNLD no contexto educacional brasileiro, optei por avaliar a textualização das

coleções didáticas de física disponibilizadas pelo programa entre os períodos de 2018-2020 e 2021-2024. A escolha destes períodos específicos ocorre dado a possibilidade de comparar as discussões sobre as RSC presentes nas obras retiradas do programa, quando do meu ingresso no mestrado, e que faziam parte de uma proposta educacional diferente da que está vigente, com as que estão em uso nas escolas e estão ancoradas na Base Nacional Comum Curricular (BNCC). No quadro 6 listo as coleções aprovadas no período de 2018-2021 que serão foco de análise.

Quadro 6 – Coleções didáticas aprovadas pelo PNLD (2018-2021) para a componente curricular de Física

Identificação	Referência
CD18.01	BONJORNO, J. R. et al. **Física**. 3 ed. São Paulo: FTD, 2016.
CD18.02	BARRETO FILHO, B.; DA SILVA, C. X. **Física aula por aula**. 3. ed. São Paulo: FTD, 2016.
CD18.03	VÁLIO, A. B. M. et al. **Física**. 3. ed., São Paulo: SM, 2016.
CD18.04	YAMAMOTO, K.; FUKE, L. F. **Física para o ensino médio**. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
CD18.05	TORRES, C. M. A. et al. **Física: ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2016.
CD18.06	PIETROCOLA, M. et al. **Física em Contextos**. 1. ed. São Paulo: Editora do Brasil, 2016.
CD18.07	GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. **Física**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
CD18.08	BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **Física**. 3. ed. São Paulo: Editora Ática, 2016.
CD18.09	LUZ, A. M. R.; ALVARENGA, B. A.; GUIMARÃES, C. C. **Física: contexto e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2016.
CD18.10	GASPAR, A. **Compreendendo a Física**. 3. ed. São Paulo: Ática, 2016.
CD18.11	GONÇALVEZ FILHO, A.; TOSCANO, C. **Física: interação e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Leya, 2016.
CD18.12	MARTINI, G. et al. **Conexões com a física**. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2016.

Fonte: autoria própria.

Com a instituição da BNCC, ocorreram no PNLD diversas modificações, tanto em sua organização quanto no processo de avaliação das coleções para uso no período de 2021-2024. O guia do PNLD (2021-2024) expressa que:

> Com a edição do Decreto nº 9.099, de 18/07/2017, os Programas do Livro foram unificados. Assim, as ações de aquisição e distribuição de livros didáticos e literários, anteriormente contempladas pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e pelo Programa Nacional Biblioteca na Escola (PNBE), foram consolidadas em um único Programa, chamado Programa Nacional do Livro e do Material

> Didático – PNLD. Além disso, a abrangência do Programa também aumentou, passando a incluir o atendimento à educação infantil e às instituições comunitárias, confessionais ou filantrópicas sem fins lucrativos e conveniadas com o Poder Público, desde que atendam à educação infantil. (BRASIL, 2021, p. 16).

Desta maneira, o PNLD passou a distribuir diferentes tipos de materiais didáticos, identificados como objetos, são eles: Objeto 1: Obras Didáticas de Projetos Integradores e de Projeto de Vida destinadas aos estudantes e professores do ensino médio; Objeto 2: Obras Didáticas por Áreas do Conhecimento e Obras Didáticas Específicas destinadas aos estudantes e professores do ensino médio; Objeto 3: Obras de Formação Continuada destinadas aos professores e à equipe gestora das escolas públicas de ensino médio; Objeto 4: Recursos Digitais; e Objeto 5: Obras Literárias. Nesta pesquisa, limitarei as análises ao objeto 2, visto que correspondem às coleções didáticas destinadas ao ensino de Ciências/Física.

No que diz respeito às obras didáticas (objeto 2), dentre as principais alterações, destaca-se a substituição de coleções destinadas exclusivamente aos componentes curriculares de Biologia, Física e Química, por coleções destinadas à área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias.

Tais modificações resultaram em alterações quanto aos critérios de avaliação das obras, uma vez que buscam incorporar aspectos de toda a área de Ciências da Natureza, em contrapartida àqueles voltados exclusivamente ao conteúdo de física. Todavia, ainda estão presentes tópicos como: apresentar princípios éticos necessários à construção da cidadania, valorizar a prática científica, dispor problemas vinculados à vida cotidiana do estudante, utilizar abordagens diversificadas sobre os mesmos conceitos e, por fim, buscar diálogo com os temas contemporâneos (BRASIL, 2019).

Foram disponibilizadas sete coleções didáticas para escolha dos professores, todas compostas por seis volumes, em que cada um corresponde a uma unidade temática distinta, integrando as disciplinas de Física, Química e Biologia. No quadro 4 listo as coleções selecionadas para análise.

Quadro 7 – Coleções didáticas aprovadas pelo PNLD (2021-2024) para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias

Identificação	Referência
CD21.01	MORTIMER, E. et al. **Matéria, Energia e Vida: Uma Abordagem Interdisciplinar**. São Paulo: Scipione, 2020.
CD21.02	GODOY, L.; DELL'AGNOLO, R. M.; MELO, W. C. **Multiversos: Ciências da Natureza**. São Paulo: FTD, 2020.
CD21.03	LOPES, S.; ROSSO, S. **Ciências da Natureza**. São Paulo: Moderna, 2020.
CD21.04	AMABIS, J. M. et al. **Moderna Plus: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: Moderna, 2020.
CD21.05	FUKUI, A. et al**. Ser Protagonista: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: SM, 2020.
CD21.06	THOMPSON, M. et al. **Conexões: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: Moderna, 2020.
CD21.07	SANTOS, K. C. et al. **Diálogo: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: Moderna, 2020.

Fonte: autoria própria.

As obras apresentadas nos quadros 6 e 7 correspondem ao universo amostral de coleções destinadas ao Ensino médio selecionadas para análise, para tanto, obtivemos a versão digitalizada do manual do professor destas coleções.

3.2.2.2 Identificação dos conteúdos

Após a identificação e obtenção destas obras, realizei a leitura dos sumários das coleções listadas nos quadros 6 e 7, com o objetivo de identificar quais delas abordavam temas relacionados à Física Moderna e Contemporânea, com atenção a discussões voltadas à Física Nuclear.

Em seguida, realizei a leitura integral dos capítulos identificados, à procura de elementos que fizessem referência ao contexto histórico do PM, portanto, além de referências diretas ao episódio, destaquei referências à existência de armamentos nucleares ou de aplicações bélicas vinculados a fenômenos nucleares. Destaco que, para auxiliar nesta etapa, realizei uma busca pelos seguintes termos: "Projeto Manhattan", "bomba atômica", "Hiroshima" e "Nagasaki". Os quadros a seguir sintetizam os resultados encontrados nesta primeira leitura.

Quadro 8 – Identificação das coleções pertencentes ao PNLD 2018-2021 que abordam a produção de armamentos nucleares

Identificação	Coleção	Volume e Páginas
CD18.01	Bonjorno et al. (2016)	Volume 3 – 248, 253, 260 e 261
CD18.02	Barreto e Xavier (2016)	Volume 3 – 229, 231, 234, 238 e 240
CD18.03	Válio et al. (2016)	Volume 3 – 228 e 230
CD18.04	Kazuhito e Fuke (2016)	Volume 3 – 245, 256, 257, 262, 267, 275, 279, 281 e 282
CD18.05	Torres et al. (2016)	Volume 3 – 215, 232, 243 e 246 Manual do professor - 346
CD18.06	Pietrocola et al. (2016)	Volume 3 – 234 e 243 Manual do professor - 78
CD18.07	Guimarães, Piqueira e Carron (2016)	Volume 3- 246 e 248 Manual do professor - 372
CD18.08	Biscuola et al. (2016)	Orientações didáticas - 391
CD18.09	Máximo e Alvarenga (2016)	Volume 3 - 220
CD18.10	Gaspar (2016)	Manual do professor - 390
CD18.11	Aurélio Filho e Toscano (2016)	Manual do professor - 291
CD18.12	Sant'Anna et al. (2016)	Volume 3 – 229 e 240 Manual do professor - 387

Fonte: autoria própria.

Quadro 9 - Identificação das coleções pertencentes ao PNLD 2021-2024 que abordam a produção de armamentos nucleares

Identificação	Coleção	Volume	Páginas
CD21.01	Mortimer et al. (2020)	Matéria, luz, som	Manual do Professor - 274 Livro do Aluno - 139
CD21.02	Godoy, Dell'agnolo e Melo (2020)	Ciência tecnologia e cidadania	Manual do Professor – 234 e 237 Livro do Aluno - 99
CD21.03	Lopes e Rosso (2020)	Água, agricultura e uso da terra	Manual do Professor - LVIII Livro do Aluno - 110
		Energia e consumo sustentável	Livro do Aluno - 86
CD21.04	Amabis et al. (2020)	O conhecimento científico	Livro do Aluno - 13
		Universo e evolução	Manual do Professor – LXVI e LXXIX Livro do Aluno – 137, 138 e 139
CD21.05	Fukui, A. et al. (2020)	Composição e estrutura dos corpos	Manual do Professor - 199, 200, 201 e 203 Livro do Aluno – 52 e 57
CD21.06	Thompson et al. (2020)	Saúde e tecnologia	Livro do Aluno - 144, 148 e 149
		Universo, materiais e evolução	Livro do Aluno - 56
CD21.07	Santos et al. (2020)	O universo da ciência e a ciência do universo	Manual do Professor – XLVI e XLVI Livro do Aluno – 12 e 28

Fonte: autoria própria.

3.2.3 Procedimento de análise

Após a identificação das páginas que apresentam os conteúdos relacionados ao tema de interesse, dei início ao procedimento de análise dos trechos selecionados. Tais análises ocorreram em duas etapas, de modo a responder inicialmente às questões norteadoras e, por fim, ao problema de pesquisa proposto no início deste capítulo.

A primeira etapa teve como objetivo compreender os modos pelos quais as obras apresentam os conteúdos históricos relacionados ao PM (Questão 1), afim de investigar o potencial do episódio para abordar elementos éticos do trabalho científico.

Para isso, retomei a leitura do material afim de evidenciar em quais temas as menções foram realizadas, tal como o modo como estas informações se fariam presentes (texto central da obra, quadros complementares, biografias, etc.). Neste momento, busquei ainda identificar se as obras fazem referência aos cientistas envolvidos no desenvolvimento do Projeto Manhattan, entre os quais: Leó Szilárd, Robert Oppenheimer, Enrico Fermi, Edward Teller, Klaus Fuchs, Ernest Lawrence, Leslie Groves, Seth Neddermeyer, dentre outros evidenciados ao longo do primeiro capítulo.

Quanto a avaliação do conteúdo, busquei identificar se os manuais apresentavam informações fundamentais para a compreensão do processo histórico, tais como: a) argumentos favoráveis e contrários ao desenvolvimento de bombas atômicas; b) o objetivo do Projeto Manhattan; c) Implicações éticas e morais do programa; d) manifestações de apoio ou oposição por parte dos cientistas e; e) consequências científicas e políticas após o lançamento das bombas.

Após compreender o modo como as obras apresentaram os saberes históricos, dei início à segunda etapa de análise, afim de avaliar a possibilidade de discussões acerca das RSC nos trechos destacados (Questão 2).

Para tanto, a partir das categorias apresentadas no quadro 5, construídas ao longo do capítulo 2, desenvolvi uma ficha de análise com questões voltadas ao conteúdo apresentado pelas coleções didáticas, de modo que cada questão busca avaliar a presença de conteúdos que possibilitam

estabelecer discussões acerca de diferentes aspectos das RSC. A ficha pode ser observada no quadro abaixo.

Quadro 10 – Ficha de Análise para as RSC nos manuais escolares selecionados

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas?
	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais?
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas?
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas?
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais?
Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos	6	as maneiras como os cientistas lidam com a divulgação de suas pesquisas?
	7	reflexões acerca da participação dos cientistas em espaços voltados para a construção de políticas públicas?
	8	a importância de se tornar usual o diálogo entre os cientistas e a sociedade em geral?

Fonte: autoria própria

Por fim, os resultados, que serão apresentados no capítulo seguinte, foram agrupados em torno das categorias de análise, afim de obter observações gerais sobre as possibilidades encontradas para discutir elementos das RSC por meio das obras.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresentarei as análises das coleções didáticas indicadas nos quadros 8 e 9 do capítulo anterior. Para tanto, apresentarei as discussões particulares de cada coleção pertencente ao PNLD (2018-2020) e ao PNLD (2021-2024).

Afim de responder *"De que maneira o Projeto Manhattan é inserido nos manuais didáticos de Ciências/Física destinados ao Ensino Médio?",* apresentarei, inicialmente, uma descrição das obras, de modo a destacar tópicos relacionados às pesquisas evidenciadas ao longo do Capítulo 1, com destaque aos elementos e as discussões relacionados à confecção das bombas atômicas e à resolução de conflitos por meio do desenvolvimento tecnológico.

Em seguida, afim de compreender *"Que aspectos da "Responsabilidade Social dos cientistas é possível identificar nos manuais",* irei discutir como cada aspecto das RSC, evidenciados a partir de categorias no quadro 5, podem ser trabalhados ou problematizados, de modo a responder às questões apresentadas na ficha de análise (quadro 10).

Por fim, apresentarei uma síntese dos resultados obtidos, afim de responder ao problema de pesquisa e discutir possibilidades para a utilização dos materiais analisados em aulas de física com intuito de trazer discussões sobre as responsabilidades sociais dos cientistas.

4.1 PNLD (2018-2020)

4.1.1 CD18.01 - Bonjorno et al. (2016)

Em um primeiro momento, nota-se que a CD18.01 reconhece a importância da HFSC para a compreensão de aspectos do desenvolvimento científico, ao afirmar que "a física não deve ser apresentada de forma descontextualizada do mundo" e que, na obra, os conteúdos são apresentados "de forma indissociada da História, da Química, da Biologia e aproximada do cotidiano" (BONJORNO ET AL., 2016, p. 3).

Ao abordar a equivalência entre massa e energia, nota-se o uso de uma imagem para representar uma explosão nuclear (Figura 24), afim de exemplificar uma aplicação tecnológica da liberação da energia nuclear.

Figura 24 – Atol de Bikini em 1954.



Fonte: Bonjorno (2016, p. 221)

No capítulo seguinte, ao trabalhar o conceito de Radioatividade, são levantadas discussões sobre os riscos e benefícios das aplicações tecnológicas para o contexto social. Como exemplo, descreve o plutônio, como "um dos elementos químicos mais perigosos para a saúde [...] utilizado na bomba lançada sobre Nagasaki em 9 de agosto de 1945" (BONJORNO, 2016, p. 248).

Em seguida, ao apresenta as reações de fissão e fusão nuclear e faz algumas menções ao contexto histórico e às aplicações do saber.

> Pouco antes da Segunda Guerra Mundial, já se previa que o bombardeamento de núcleos atômicos instáveis, como o do urânio e plutônio, poderia resultar em uma cisão do átomo em dois núcleos mais leves, além de dois ou três nêutrons e uma enorme quantidade de energia. A comprovação disso se deu no primeiro teste realizado com a bomba atômica no Novo México, Estados Unidos, em 1945. (BONJORNO, 2016, p. 253).

Entretanto, o trecho apresenta concepções distorcidas do processo histórico. Em um primeiro momento é indicado que "já se previa" que o bombardeamento de elementos como urânio e plutônio poderia acarretar no processo de cisão nuclear, entretanto, como discutido no primeiro capítulo, tal

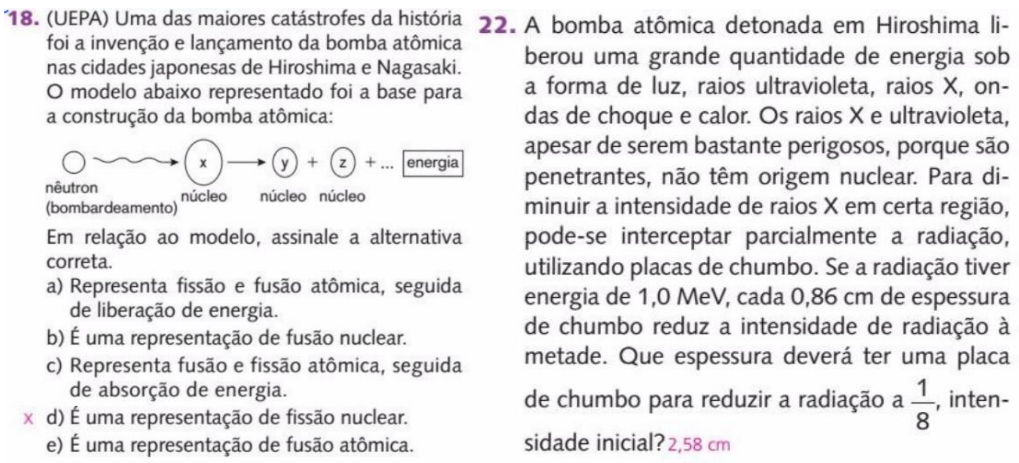
processo se mostrou surpreendente a Hans e Strassmann, causando grande impacto na comunidade científica. A hipótese de cisão dos átomos havia sido levantada apenas por pesquisadores isolados, que por sua vez, não alcançaram apoio da comunidade científica por ausência de uma constatação experimental.

Ainda, ao afirmar que “A comprovação disso se deu no primeiro teste realizado com a bomba atômica” a obra incorre em um segundo equívoco, uma vez que o Teste Trinity não tinha como objetivo comprovar o conceito, mas sim verificar o funcionamento do método de explosão utilizado nas bombas de plutônio. Destaca-se ainda que a comprovação e o consenso da academia científica sobre o processo de fissão nuclear ocorreram durante a realização de experimentos ao longo do ano de 1939, fundamental para a construção do primeiro reator nuclear já em 1942.

Em seguida, ao mencionar as usinas nucleares, a obra contrapõe o que seria essa aplicação “benéfica” com a possibilidade de produzir armamentos, ao indicar que “Tanto nos reatores nucleares quanto nas bombas atômicas as reações nucleares se dão em cadeia” (BONJORNO, 2016, p. 253).

Ainda, notam-se duas questões relacionadas ao processo de fabricação e as consequências do lançamento das bombas atômicas, como destacado na figura abaixo.

Figura 26 – Questões que fazem referência às bombas atômicas encontradas na CD18.01



18. (UEPA) Uma das maiores catástrofes da história foi a invenção e lançamento da bomba atômica nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki. O modelo abaixo representado foi a base para a construção da bomba atômica:

Em relação ao modelo, assinale a alternativa correta.

a) Representa fissão e fusão atômica, seguida de liberação de energia.
b) É uma representação de fusão nuclear.
c) Representa fusão e fissão atômica, seguida de absorção de energia.
x d) É uma representação de fissão nuclear.
e) É uma representação de fusão atômica.

22. A bomba atômica detonada em Hiroshima liberou uma grande quantidade de energia sob a forma de luz, raios ultravioleta, raios X, ondas de choque e calor. Os raios X e ultravioleta, apesar de serem bastante perigosos, porque são penetrantes, não têm origem nuclear. Para diminuir a intensidade de raios X em certa região, pode-se interceptar parcialmente a radiação, utilizando placas de chumbo. Se a radiação tiver energia de 1,0 MeV, cada 0,86 cm de espessura de chumbo reduz a intensidade de radiação à metade. Que espessura deverá ter uma placa de chumbo para reduzir a radiação a $\frac{1}{8}$, intensidade inicial? 2,58 cm

Fonte: Bonjorno (2016, p. 256)

Tais questões não são pensadas para avaliar o conhecimento histórico ou epistemológico do aluno. Assim, os saberes históricos destinam-se apenas a introdução das questões, de modo a não impactar o curso de pensamento necessário para resolve-las.

Por fim, em um quadro complementar denominado “A história conta”, é apresentado o texto “Entrevista com o físico José Leite Lopes”, realizada durante o 50º aniversário da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, no qual são apresentadas diversas informações relacionadas ao PM e as consequências para o contexto social e científico.

Inicialmente, o físico destaca as pesquisas desenvolvidas na Alemanha em 1939, com grande impacto acadêmico, tendo em vista que “nunca se tinha visto a possibilidade de uma liberação tão fantástica de energia”. Na sequência aponta que o desenvolvimento da energia nuclear ocorreu “no âmbito do Projeto Manhattan, nos Estados Unidos, com participação de eminentes físicos europeus e norte-americanos” (BONJORNO, 2016, p. 260).

O próximo tópico da entrevista discute a repercussão mundial a respeito do lançamento das bombas, onde podem ser observados elementos da influência política no desenvolvimento científico e as disputas para o controle das novas tecnologias.

O terceiro tópico aborda a forma como o Brasil reagiu ao impasse nuclear global. Leite Lopes destaca a participação do Almirante Álvaro Alberto na Comissão de Energia Nuclear, que ao reconhecer a atuação fundamental dos conselhos nacionais de pesquisa para o desenvolvimento científico e tecnológico nos demais países, trouxe para o Brasil a necessidade de criação de tal organização estatal que apoiasse a pesquisa científica.

O último tópico da entrevista questiona sobre a cooperação internacional para o desenvolvimento da energia atômica. Em resposta, o físico discorre acerca do desenvolvimento do conhecimento científico durante o pós-guerra e da disputa para o controle da tecnologia nuclear.

Após a exposição do texto, a obra apresenta uma questão sobre os motivos que levaram os EUA a investir bilhões de dólares na construção da bomba atômica, para tanto, descreve o PM como “uma iniciativa do governo estadunidense em construir, no menor tempo possível, armas nucleares para vencer os alemães na Segunda Guerra Mundial”.

Destaco que a apresentação do PM desta forma se constitui como uma concepção reduzida do processo histórico, ao ignorar os conflitos econômicos e geopolíticos contra a União Soviética, fundamentais para a efetivação do projeto. Portanto, para uma compreensão histórica mais fidedigna dos acontecimentos e do processo de pesquisa científica, faz-se necessário um processo investigativo por fontes externas a obra, assim como ambientes de discussões sobre o tema.

Nota-se a obra aborda discussões relacionadas aos armamentos nucleares em dois momentos distintos, sendo eles ao trabalhar conceitos da teoria da relatividade e da fusão nuclear. Estas inserções foram feitas tanto por meio do texto principal, ao trabalhar os conceitos, como por meio de imagens, questões e quadros complementares.

Por sua vez, as menções ao PM estão presentes apenas no quadro complementar ao final da obra, de modo resumido, sem evidenciar a importância do projeto para os desdobramentos das pesquisas. Porém, as informações presentes no quadro podem contribuir para o início de discussões sobre o tema, uma vez que supera uma visão estritamente conceitual. O quadro abaixo apresenta as RSC evidenciadas na coleção.

Quadro 11 – Evidência das RSC em meio a CD18.01

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Apresenta Ilustrações e uma descrição dos impactos dos lançamentos sob as cidades de Hiroshima e Nagasaki; • Menciona a influência política da energia nuclear em um contexto global;
	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares; • Comparações entre os benefícios e malefícios das radiações ionizantes;
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas	• Criação da Comissão de Energia Atômica para o controle civil das tecnologias nucleares;

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Influência do regime nazista para o posicionamento dos cientistas a favor de um programa nuclear; • Disputa entre cientistas e militares pelo controle das pesquisas nucleares; • Importância das agências de fomento para as pesquisas nucleares em diversos países;
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: diagnóstico e tratamento de doenças, esterilização de alimentos, datação de fósseis e produção de energia elétrica;
Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos	8	reflexões acerca da participação dos cientistas em espaços voltados para a construção de políticas públicas.	• Apresenta a participação de Alvaro Alberto para a formulação de uma política científica nacional;

Fonte: autoria própria

No que diz respeito à primeira questão, são apresentadas imagens para demonstrar o impacto causado pelo lançamento das bombas nas cidades atingidas (Figura 25), além de indicar a quantidade de mortes em consequência destas explosões. Também, durante a entrevista, o texto diz que as pesquisas do PM deram lugar à “tragédia da bomba atômica” (BONJORNO, 2016, p. 260).

> O resultado foi a destruição da cidade, a morte imediata de cerca de 74000 pessoas e a mesma quantia de sobreviventes que adquiriram câncer em razão da radiação. (BONJORNO, 2016, p. 248).

Figura 25 – Explosão da bomba e a cidade de Nagasaki após o bombardeio em 1945



Fonte: Bonjorno (2016, p. 248)

Além das implicações sociais do uso da bomba, uma das falar de Leite Lopes faz referência à capacidade de estas tecnologias influenciarem politicamente a sociedade, observada a seguir.

> Gradativamente os Estados Unidos viram que estavam perdendo o segredo. A União Soviética fez a bomba sozinha, a França desenvolveu a energia nuclear por conta própria, a Inglaterra também, a Holanda cooperava com a Noruega. [...] Os Estados Unidos e a União Soviética concordaram então em promover uma grande conferência internacional em que os segredos seriam revelados. Milhares de trabalhos foram apresentados, revelando todos os dados necessários à construção de reatores de potência para pesquisa e as aplicações de radioisótopos. [...] **Nessa conferência ficou clara a força política da energia atômica.** (BONJORNO, 2016, p. 261, grifo meu).

Portanto, as referências à catástrofe de Hiroshima e Nagasaki, seguido de uma breve descrição do ocorrido, e às disputas pela tecnologia nuclear no período pós guerra indicam haver consequências políticas e sociais causadas pelo desenvolvimento científico e tecnológico, que modificam as relações das forças geopolíticas e contribuem para a formação de novos centros de poder.

A terceira questão pode ser observada a partir da fala de José Leite Lopes sobre as primeiras reações após o lançamento das bombas, ao indicar que:

> Logo após defender a tese, assisti, em janeiro de 1946, à primeira reunião da Sociedade Americana de Física, em Nova Iorque. Os físicos norte-americanos discutiram intensamente a questão e propuseram a criação da Comissão de Energia atômica, que deveria ficar sob controle civil.

Apesar de não conter informações quanto aos tópicos das discussões que estariam sendo realizadas, tampouco dos desdobramentos das discussões como evidenciado no capítulo 2 desta dissertação, o trecho demonstra uma tentativa da comunidade científica estadunidense em reverter a posse das tecnologias nucleares.

Por sua vez, ao longo do texto que compreende a entrevista, podem ser notadas diversas referências às influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas (questão 4).

Quanto às influências políticas, cabe destacar as discussões sobre os conflitos de interesse existentes entre a comunidade científica e os militares integrantes do PM, no sentido de definir o controle das pesquisas nucleares.

> Durante a guerra, O Projeto Manhattan fora dirigido por um general, o Leslie Groves. E naturalmente devia haver militares querendo controlar a energia atômica, porque a bomba atômica é uma arma de guerra. Mas os físicos achavam que os civis é que deveriam ditar a política de energia atômica. (BONJORNO, 2016, p. 260).

No que se refere às influencias econômicas, o texto indica a importância das agências de fomento em países como Estados Unidos, Itália e União Soviética para o incentivo à pesquisa em áreas de interesse.

Por fim, é possível realizar reflexões acerca da participação dos cientistas em espaços voltados para a construção de políticas públicas (questão 8) a partir da atuação de Álvaro Alberto para a instituição do CNPq por meio do Congresso Nacional. Nota-se a necessidade de destacar a importância da instituição para o contexto atual da pesquisa brasileira.

> No Brasil, não havia uma organização estatal que apoiasse a pesquisa científica. Enviado o projeto ao Congresso e aprovado, a lei foi sancionada no segundo governo Vargas, já em 1951. Alvaro Alberto foi o primeiro presidente do Cnpq. Pela primeira vez, formulou-se uma política científica nacional. (BONJORNO, 2016, p. 260).

4.1.2 CD18.02 - Barreto e Xavier (2016)

Durante a introdução da Unidade 5, destinada à FMC, a CD18.02 afirma que o conhecimento científico pode ser empregado de vários modos, “tanto para melhorar as condições de vida das pessoas [...] quanto para a produção de armas de extinção em massa” (BARRETO E XAVIER, 2016, p. 199).

Ainda na introdução, a obra apresenta uma questão capaz de suscitar discussões acerca da dimensão ética do trabalho científico: “Existe uma discussão ética sobre a maneira como se utiliza a Ciência e pela qual todos nós somos responsáveis. Qual sua opinião sobre isso?” (BARRETO E XAVIER, 2016, p. 199).

Nota-se que a questão faz referência, de uma maneira ampla, à forma como o saber cientifico é aplicado na sociedade, evidenciando a necessidade de se pensar estas aplicações de modo responsável. Apesar de a obra não diferir as responsabilidades dos cientistas com as responsabilidades dos demais cidadãos, tal questão pode ser um ponto de partida para discussões em torno da responsabilidade de refletir acerca das consequências das aplicações científicas.

Já no início do capítulo 15, denominado “Física Nuclear”, é apresentado um quadro intitulado “Pare e pense”, com objetivo de problematizar os impactos provenientes de aplicações tecnológicas da energia nuclear, apresenta também a imagem da explosão de uma bomba atômica (Figura 27).

Figura 27 – Explosão de uma bomba atômica.



Fonte: Barreto e Xavier (2016, p. 229)

Páginas a frente, ao descrever os processos de fissão e fusão nuclear, a obra busca exemplificar o conceito de reação em cadeia a partir de aplicações tecnológicas, para isso, cita as bombas atômicas e os reatores nucleares, como diferentes maneiras de controlar a manifestação dessas reações.

No tópico seguinte, denominado “Energia nuclear e sua utilização”, são mencionados tanto momentos trágicos da história das aplicações da energia nuclear, quanto tecnologias que proporcionaram melhorias na qualidade de vida, novamente com o intuito de contrapor a forma de aplicação destes saberes.

> Infelizmente, as tristes imagens das bombas atômicas – lançadas em 1945, durante a Segunda Guerra Mundial, sobre as cidades

> japonesas de Hiroshima e Nagasaki – estão fortemente relacionadas à expressão ‘energia nuclear’. Embora essas imagens não devam ser esquecidas pela humanidade, é preciso entender que, historicamente, os conhecimentos científicos utilizados de maneira adequada beneficiaram a sociedade, melhorando a qualidade de vida das pessoas. (BARRETO E XAVIER, 2016, p. 234).

Por fim, apresenta um quadro complementar intitulado “De volta ao começo”, afim de mostrar ao aluno a importância das experiencias históricas para “formar uma opinião crítica a respeito da energia nuclear e do uso do conhecimento científico” (BARRETO E XAVIER, 2016, p. 240).

Figura 28 – Abertura da Assembleia das Nações Unidas sobre o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares.



Fonte: Barreto e Xavier (2016, p. 240)

Portanto, a CD 18.02 aborda a questão dos armamentos nucleares ao introduzir o tema da Física Nuclear e durante a explicitação do conceito de fissão e de suas aplicações tecnológicas. Para além das explicitações no texto central, nota-se também a utilização de quadros complementares e imagens que auxiliam a apresentação do tema.

Observa-se, entretanto, que não há menções diretas a pesquisas desenvolvidas no âmbito do PM, apenas à existência de armamentos nucleares e suas consequências gerais para a sociedade, como uma breve menção à catástrofe de Hiroshima e Nagasaki e ao tratado de não proliferação de armas nucleares. Entendo, portanto, que a obra não sustenta uma abordagem do tema a partir de discussões voltadas à HFSC, sendo necessário a utilização de fontes externas para explicitação dos saberes históricos.

Quanto às RSC, foram encontrados elementos de três das questões propostas pela ficha de analise, representada no quadro abaixo.

Quadro 12 – Evidência das RSC em meio a CD18.02

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares;
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina, indústria e produção de energia elétrica;
Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos	9	a importância de se tornar usual o diálogo entre os cientistas e a sociedade em geral.	• Discute a importância do conhecimento científico para a tomada de decisões acerca de suas aplicações;

Fonte: autoria própria

No que se refere à questão 9, cabe destacar a importância do quadro complementar para o tema, como destacado no trecho abaixo.

> Como cidadãos, devemos desenvolver em nós mesmos a capacidade de analisar de forma crítica tudo o que acontece à nossa volta. Isso exige que prestemos atenção não apenas aos fatos que podem ser mensurados, como índices e tabelas, mas também que levemos em conta aquilo que é mais difícil de ser medido, como os sentimentos das pessoas e os impactos sobre o equilíbrio ambiental, por exemplo. Dessa forma, poderemos nos organizar socialmente, para opinar e interferir nas decisões sobre o uso tecnológico do conhecimento científico. (BARRETO E XAVIER, 2016, p. 234).

Apesar de não evidenciar o papel do cientista para a conscientização da sociedade acerca do saber científico, o texto destaca a importância do conhecimento para uma participação efetiva no processo de tomada de decisões, de modo a problematizar uma visão neutra acerca dos problemas sociais. Compreendo que tal contexto pode gerar um ambiente de discussões acerca da apropriação do conhecimento científico e da necessidade em se manter informados sobre os temas de pesquisas mais atuais.

4.1.3 CD18.03 - Válio et al. (2016)

A CD 18.03 menciona o tema dos armamentos nucleares apenas em meio a discussões referentes à Física Nuclear, ao trabalhar os conceitos de radioatividade e fissão nuclear. A apresentação do tema ocorre a partir de um quadro complementar, intitulado “A era atômica”, reproduzido abaixo.

> Uma bomba de fissão nuclear (bomba A) é, em linhas gerais, constituía de dois pedaços de material físsil (urânio-235), um em forma de esfera vazia, e o outro contido dentro de um tubo. Quando a explosão de uma carga convencional projeta o pedaço de urânio cilíndrico na esfera vazia, forma-se um único bloco de urânio, de massa superior à massa crítica, que deflagra a reação de fissão em cadeia. (VÁLIO ET AL., 2016, p. 230).
>
> Para que a reação tenha a máxima eficácia, é necessário que ela ocorra o mais rapidamente possível, o que se consegue empregando-se um material físsil muito puro e rodeando-o de um invólucro que devolve para o centro os nêutrons que teriam tendencia a sair. (VÁLIO ET AL., 2016, p. 230).

O texto expõe elementos fundamentais para a compreensão do funcionamento de uma bomba atômica, como: o método de explosão, o conceito de massa crítica e a reação de fissão em cadeia, além de comentários sobre a estrutura interna da bomba. Entretanto, tais saberes se mostram desconectados do contexto histórico e de discussões sobre o processo de produção do conhecimento.

No que se refere ao fenômeno da radioatividade, a CD18.03 indica que o conceito é “frequentemente associado a armas, como a bomba atômica, ou a acidentes” (VÁLIO ET AL., 2016, p. 228), entretanto, aponta também a existência de “muitas aplicações benéficas da radiação”, afim de contrapor os benefícios e malefícios provenientes destas tecnologias.

Por fim, é apresentada uma questão que remete ao lançamento das bombas, ao apresentar o poema “Rosa de Hiroshima”, de Vinicius de Moraes, e solicitar que o aluno “Explique o título da canção, relacionando-o a situações descritas ao longo do capítulo” (VÁLIO ET AL., 2016, p. 237).

Portanto, assim como na coleção anterior, não são observadas menções diretas ao PM, apenas a existência dos armamentos nucleares, de modo a

compara-los com aplicações da física nuclear para outras esferas da vida humana. O quadro abaixo sintetiza as possibilidades de discussões acerca da RSC na obra.

Quadro 13 – Evidência das RSC em meio a CD18.03

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Apresenta o poema “Rosa de Hiroshima” que explicita a destruição nas cidades de Hiroshima e Nagasaki
	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre os benefícios e malefícios das aplicações do fenômeno da Radioatividade
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina, agricultura, indústria e as questões energéticas

Fonte: autoria própria

4.1.4 CD18.04 - Kazuhito e Fuke (2016)

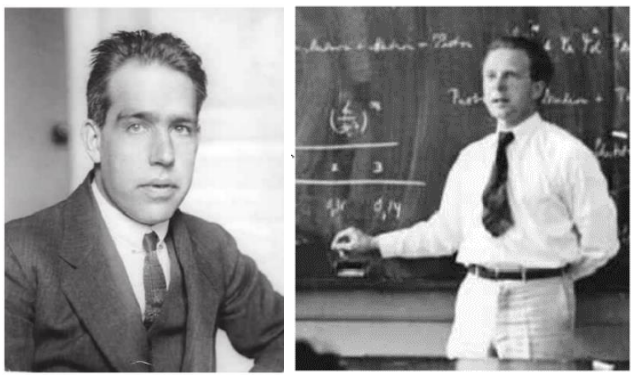
Diferente das obras apresentadas anteriormente, na CD18.04 foram encontradas discussões ao longo dos três capítulos da unidade voltada para a FMC, intitulados “Teoria da Relatividade”, “Teoria Quântica” e “Física Nuclear”.

Inicialmente, em um quadro complementar, denominado “Física na História”, a obra apresenta uma breve biografia de Albert Einstein, onde é dito que, durante a década de 30, o cientista teve de emigrar para os EUA devido a perseguição dos nazistas, onde “adotou a cidadania americana e participou do Projeto Manhattan” (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 245). É dito também que o cientista “reconheceu o erro do uso da energia nuclear para fins militares após constatar o que ocorreu com as cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão” (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 245).

Entretanto, como discutido no primeiro capítulo, Einstein não contribuiu para o desenvolvimento científico do Projeto Manhattan, limitando-se ao envio da carta junto de Szilard ao presidente norte-americano, afim de alertar os perigos do desenvolvimento científico na Alemanha nazista.

No capítulo seguinte, ao abordar a mecânica quântica, são observados elementos históricos do desenvolvimento de armas nucleares em meio a descrições de fotografias que retratam os físicos Niels Bohr e Werner Karl Heisenberg.

Figura 29 – Fotografia de Niels Bohr (à esquerda) e Werner Karl Heisenberg (à direita)



Fonte: Kazuhito e Fuke (2016, p. 256)

Quanto a Bohr, é dito que o físico “estendeu o conhecimento sobre a fissão nuclear”, e que, ao perceber que este conhecimento poderia ser aplicado para a construção de bombas atômicas, “tentou demover os líderes dos aliados na 2ª Guerra Mundial de buscar esse objetivo, sem obter, contudo, sucesso” (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 256).

Por sua vez, ao apresentar Heisenberg, faz menção ao desenvolvimento científico da Alemanha, apontando que o cientista “contribuiu para o avanço da Física Nuclear, trabalhando com Otto Hahn no esforço de guerra alemão para produzir a bomba atômica” (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 257). Nota-se que não são disponibilizadas informações que retratam as condições da pesquisa nuclear na Alemanha nazista.

Entendo que estas informações se mostram fundamentais ao intuito de pensar as controvérsias do trabalho científico, tal como a relação direta entre as condições históricas e a construção de sentido por parte dos pesquisadores, tanto para motivação quanto para os desdobramentos da pesquisa.

Nota-se ainda que os trechos elucidam os esforços dos cientistas em pensar as consequências da existência de uma bomba atômica no mundo pós-guerra, e são importantes para compreender os desdobramentos políticos e

científicos que seguiram após o lançamento das bombas as maneiras como eles lidaram com as consequências sociais de suas pesquisas.

No próximo capítulo, voltado à física nuclear, a obra busca problematizar as implicações do conhecimento científico, para tanto, introduz uma breve descrição do PM.

> Projeto Manhattan é o nome mais conhecido para os esforços de obter as primeiras armas nucleares durante a Segunda Guerra Mundial. Formado por cientistas de todo o mundo e da cooperação entre EUA, Reino Unido e Canadá, esse projeto foi o responsável por criar as bombas nucleares lançadas no Japão e que mataram cerca de 140 mil pessoas diretamente e milhares indiretamente, vítimas da radiação. (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 262).

Figura 30 – Fotografia tirada no Pacífico Sul, em outubro de 1952



Fonte: Kazuhito e Fuke (2016, p. 262)

Além das menções destacadas acima, podem ser observados dois textos complementares que versam sobre o desenvolvimento científico da física nuclear e os modos de aplicar estes conhecimentos.

O primeiro texto, intitulado “Usinas nucleares brasileiras”, comenta as semelhanças e diferenças entre um reator nuclear e uma bomba atômica, destacando a importância de altas concentrações de urânio enriquecido para a produção de armamentos nucleares.

Já o segundo texto, intitulado “É possível estudar o impossível?”, tem por objetivo discutir o desenvolvimento da atividade científica, para isso, comenta alguns episódios nos quais as pesquisas pareciam contradizer as concepções vigentes, resultando em profundas modificações do saber. Dentre

estes episódios, destaco a exploração da energia nuclear e suas consequências.

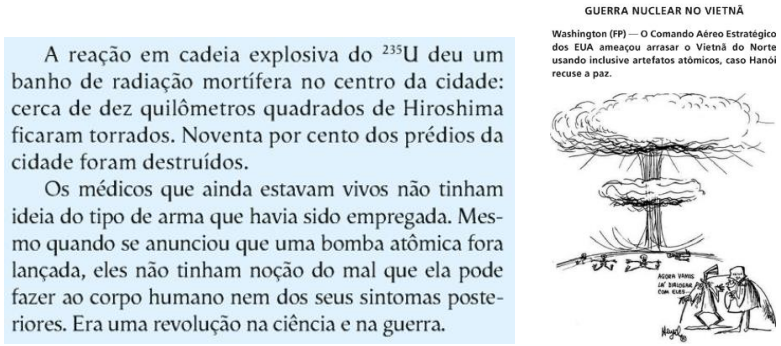
De início o texto indica que, apesar de reconhecer a enorme quantidade de energia represada no núcleo atômico, “na década de 1930 quase todo mundo acreditava, até Einstein, que uma bomba atômica era impossível” (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 279).

> Mas o físico atômico Leo Szilard lembrou-se de ter lido o romance de H. G. Wells, de 1914, The World Set Free, no qual Wells previa a criação da bomba atômica. No livro, ele afirmava que o segredo da bomba atômica seria desvendado por um físico em 1933. Por acaso Szilard tropeçou nesse livro em 1932. Espicaçado pelo romance, em 1933, exatamente como previra Wells duas décadas antes, ele teve a ideia de ampliar a potência de um único átomo por meio de uma reação em cadeia, de modo que a energia proveniente da fissão de um único núcleo de urânio fosse ampliada em muitos trilhões de vezes. (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 279).
>
> Szilard então colocou em prática uma série de experimentos fundamentais e negociações secretas entre Einstein e o presidente Franklin Roosevelt que levariam ao Projeto Manhattan, que construiu a bomba atômica. (KAZUHITO E FUKE, 2016, p. 279).

É interessante observar que o texto aponta a influência da cultura no imaginário do cientista, como discutido por Smith (2008), de modo a demonstrar a complexidade dos fatores capazes de motivar o pesquisador em direção a um determinado empreendimento científico. Por outro lado, o texto atribui a Szilard uma responsabilidade maior do que aquela evidenciada historicamente, uma vez que suas hipóteses iniciais não foram capazes de motivar a comunidade científica para a construção dos armamentos nucleares, devido à dificuldade em obter financiamento, sendo necessário que a fissão nuclear fosse explicada, em 1939, para que de fato a construção de ogivas nucleares se tornassem uma possibilidade científica.

Por fim, cabe destacar o material de apoio disponibilizado para a resolução de alguns exercícios, de modo a evidenciar a aplicação dos conceitos para a produção de armamentos nucleares e suas consequências para os conflitos armados.

Figura 31 – Material de apoio para solução das questões EP11 e EP12



A reação em cadeia explosiva do ^{235}U deu um banho de radiação mortífera no centro da cidade: cerca de dez quilômetros quadrados de Hiroshima ficaram torrados. Noventa por cento dos prédios da cidade foram destruídos.

Os médicos que ainda estavam vivos não tinham ideia do tipo de arma que havia sido empregada. Mesmo quando se anunciou que uma bomba atômica fora lançada, eles não tinham noção do mal que ela pode fazer ao corpo humano nem dos seus sintomas posteriores. Era uma revolução na ciência e na guerra.

GUERRA NUCLEAR NO VIETNÃ

Washington (FP) — O Comando Aéreo Estratégico dos EUA ameaçou arrasar o Vietnã do Norte usando inclusive artefatos atômicos, caso Hanói recuse a paz.

Fonte: Kazuhito e Fuke (2016, p. 281)

Nota-se que as discussões problematizam a existência e utilização de armamentos nucleares, evidenciando o desequilíbrio de poder entre nações nuclearmente armadas e as que não possuem tais tecnologias. Entretanto, apesar de remeter ao contexto histórico, as questões são direcionadas ao conceito de fissão nuclear, de modo que os saberes históricos são utilizados apenas para a apresentação da questão. A tabela abaixo resume as possibilidades de discussões acerca das RSC na obra.

Quadro 14 – Evidência das RSC em meio a CD18.04

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Apresenta questões que descrevem os impactos dos lançamentos sob as cidades de Hiroshima e Nagasaki
	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares • Comparações entre os benefícios e malefícios das aplicações das radiações ionizantes
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas	• Discute as atitudes de Bohr e Einstein após a construção dos armamentos nucleares
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Explicita que o conhecimento científico sofre influência de outras esferas (política, religiosa, econômica, por exemplo)
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina nuclear, a datação por isótopos, a produção de energia elétrica e a irradiação de alimentos

Fonte: autoria própria

No que se refere à questão 4, é fundamental evidenciar a importância da introdução ao tema da física nuclear para debater as influências de fatores externos à pesquisa científica, como destacado no trecho abaixo. Nota-se ainda a possibilidade de problematizar a existência de uma visão neutra da atividade científica e, neste sentido, as RSC que estariam associadas a esta concepção de ciência.

> A ciência não está livre de julgamento, mas, muitas vezes, o conhecimento científico sofre intervenções de outras esferas (política, religiosa, econômica, por exemplo) quando ainda nem existe um destino para o resultado de determinada pesquisa.

4.1.5 CD18.05 - Torres et al. (2016)

Em um primeiro momento, durante o capítulo destinado à Teoria da Relatividade, Torres et al. (2016) menciona a carta de Einstein-Szilard, em meio a uma atividade em grupo na qual pede para que o aluno:

> Reúna-se com seus colegas e procurem em livros ou na internet a carta que Albert Einstein e outros intelectuais da época escreveram ao presidente estadunidense Franklin Delano Roosevelt sobre os perigos do uso bélico da energia nuclear. (TORRES ET AL., 2016, p. 200).

Mais à frente, ao apresentar uma biografia de Niels Bohr, a obra relata o envolvimento do pesquisador com o processo de desenvolvimento dos armamentos nucleares.

> Com a invasão da Dinamarca pelos nazistas, em 1940, Bohr foi para a Suécia e de lá embarcou para os Estados Unidos. Em 1943, trabalhou no laboratório de Los Alamos como consultor na construção da bomba atômica norte-americana. (TORRES ET AL., 2016, p. 215).

Cabe observar que, diferente da coleção anterior, que relata os esforços de Bohr em discutir as consequências das bombas atômicas no pós guerra, Torres et al. (2016) enfatiza seus esforços científicos. Ao observar o contexto das pesquisas, nota-se a complexidade dos fatores que levaram o pesquisador a participar e, posteriormente, questionar o desenvolvimento destes armamentos, tanto por suas contribuições políticas quanto científicas ao projeto. Entretanto, tal complexidade não pode ser observada na obra.

Nota-se que as discussões relacionadas a participações tanto de Einstein quanto de Bohr no projeto da bomba evidenciam fatores políticos que influenciaram na tomada de decisão desses cientistas, de modo a possibilitar discussões acerca do contexto geopolítico que possibilitou o desenvolvimento das bombas atômicas lançadas em 1945.

No capítulo seguinte, intitulado “Física Nuclear”, a CD18.05 disponibiliza uma apresentação dos tópicos que serão debatidos, onde afirma que “sempre que uma nova fonte de energia é descoberta, surge alguma tecnologia para aproveitá-la, algumas vezes, para uso bélico” (TORRES ET AL., 2016, p. 232). Para sustentar tal afirmação, são realizadas menções às ogivas nucleares.

> [...] Após a construção do primeiro reator nuclear, em dezembro de 1942, destinado à pesquisa científica, a fabricação da primeira bomba ‘atômica’ (na verdade é bomba nuclear) foi só uma questão de tempo. (TORRES ET AL., 2016, p. 232).

Entretanto, o trecho retrata uma construção histórica que não condiz com os acontecimentos descritos no primeiro capítulo desta pesquisa. Inicialmente, nota-se que a construção do primeiro reator não foi destinada exclusivamente a objetivos científicos, mas também aspectos econômicos e políticos, como a produção de uma nova fonte de energia e de combustíveis para as bombas nucleares. Também cabe destacar que, ao indicar a fabricação da bomba como “uma questão de tempo”, o texto diminui os investimentos e esforços realizados durante os anos de 1942 a 1945, com intuito de solucionar problemas técnicos e teóricos para a fabricação das bombas, que podem ser observadas nas cartas escritas por Serber (1943).Ainda, no que diz respeito ao contexto histórico, é evidenciada uma representação da bomba Fat Man, lançada sobre a cidade de Nagasaki em 1945.

Figura 32 – Bomba “Fat Man”, lançada sob Nagasaki, em 1945



Fonte: Torres et al. (2016, p. 232)

Em outro tópico, denominado “Fissão nuclear e Fusão nuclear”, a obra volta a comparar a concentração de urânio enriquecido necessário para a construção de reatores e armamentos nucleares. Também, afim de exemplificar a utilização da energia liberada durante o processo de fusão nuclear, é apresentada uma fotografia da explosão da primeira bomba de hidrogênio, em 1952 (Figura 33).

Figura 33 – Explosão da primeira bomba de hidrogênio, no Atol de Eniwetok, em 1952



Fonte: Torres et al. (2016, p. 243)

Por fim, uma proposta de atividade em grupo indica que “o uso pacífico da energia nuclear sempre foi questionado e até combatido por entidades ambientalistas, mesmo conhecendo sua utilidade como fonte alternativa de energia e suas aplicações na medicina” (TORRES ET AL., 2016, p. 246), em seguida, pede que os alunos pesquisem acerca das vantagens e desvantagens do uso da energia nuclear.

Além das discussões acima, evidenciadas ao longo do livro do aluno, observa-se uma última referência ao tema durante as orientações para o ensino da fissão nuclear, presente no manual do professor, solicitando que “comente brevemente sobre as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki, em agosto de 1945, na Segunda Guerra Mundial” (TORRES ET AL., 2016, p. 346).

Quadro 15 – Evidência das RSC em meio a CD18.05

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais.	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares • Comparações entre os benefícios e malefícios das aplicações da energia nuclear
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Faz alusão à carta de Einstein-Szilard ao presidente dos EUA • Influência do regime nazista para o posicionamento dos cientistas a favor de um programa nuclear
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina nuclear e a produção de energia elétrica

Fonte: autoria própria

4.1.6 CD18.06 - Pietrocola et al. (2016)

Inicialmente, afim de apresentar o termo energia nuclear, a CD18.06 indica que “Para muitas pessoas, o termo “nuclear” remete a lembranças ruins, como Hiroshima e Nagasaki, Chernobyl, Goiânia, além de outros acidentes envolvendo radiação” (PIETROCOLA et al., 2016, p. 234). Vê-se que a obra se refere aos bombardeios a Hiroshima e Nagasaki como “acidentes”, termo que pode esvaziar as intenções políticas deste evento histórico.

Assim como a CD18.03, a CD18.06 também menciona a canção “Rosa de Hiroshima”, de modo a evidenciar a destruição causada pelo lançamento das bombas. Novamente, a canção pode ser utilizada para retratar as consequências sociais do trabalho científico e as responsabilidades vinculadas a tais consequências.

> Existe até mesmo uma música de Vinicius de Moraes, cantada pelo extinto grupo Secos e Molhados, que faz menção às crianças vítimas da bomba: ‘Pensem nas crianças mudas, telepáticas [...] Da rosa de Hiroshima, a rosa hereditária, a rosa radioativa, estúpida e inválida’. (PIETROCOLA et al., 2016, p. 234).

Mais a frente, é disponibilizado um quadro complementar intitulado “Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente”, o qual expõe um texto denominado “O contexto tecnológico e social”, com objetivo de apresentar os

riscos à saúde de substancias radioativas e compara-las com seu potencial de produzir energia a partir de processos nucleares.

> embora haja vantagens enormes no uso dessa tecnologia, os riscos também são grandes. É preciso pesar isso tudo antes de ter uma opinião a respeito do assunto. (PIETROCOLA et al., 2016, p. 237).

Já no final do capítulo, em um quadro intitulado “Pesquise, proponha e debata”, a obra volta a elucidar conteúdos sobre os armamentos nucleares, com o intuito de debater as consequências dos estudos sobre a estrutura do átomo no início do século XX.

Neste sentido, afim de discutir o que chamou de “A face dos demônios”, menciona a primeira explosão nuclear, seguida de um trecho que descreve o experimento com pedaços de papeis feito por Enrico Fermi. Como orientação aos professores, a obra aponta que esse trecho tem como objetivo:

> Mostrar que, mesmo se tratando de uma explosão nuclear que futuramente poderia dar origem a bombas, o objetivo dos cientistas era a busca por uma melhor compreensão da estrutura da matéria. (PIETROCOLA et al., 2016, p. 243).

Entretanto, tal concepção se mostra problemática quando olhamos para a história, tendo em vista que, diferente do que é exposto, a explosão tinha como objetivo avaliar o mecanismo de detonação da bomba. Deste modo, a ressignificação do Teste Trinity reforça uma concepção ingênua do evento, modificando seu objetivo e demovendo possíveis reponsabilidades dos cientistas ao assumir um comportamento inocente e ingênuo.

Na sequência, indica que o sucesso do teste e a dimensões da explosão dividiram os cientistas entre lançar ou não lançar a bomba, tendo resultado nos lançamentos sob as cidades de Hiroshima e Nagasaki. Como complemento, são utilizadas duas figuras, que representam a bomba de plutônio (representação de Fat Man, figura 33) e ao teste realizado sob o atol de bikini, em 1946 (Figura 35).

As orientações aos professores indicam que esta atividade tem por objetivo “promover a pesquisa e o debate sobre um dos assuntos que o senso comum costuma atribuir à pesquisa em Física: as bombas nucleares”, de modo que os alunos “pesquisem o Projeto Manhattan, os cientistas que participaram dele e seus financiadores” (PIETROCOLA et al., 2016, p. 78).

Figura 34 – Explosão de uma bomba atômica sob o Atol de Bikini em 1946



Fonte: Pietrocola et al. (2016, p. 243)

Por fim, cabe destacar que esta atividade possibilita discutir tanto as Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa (questões de 1 a 3) quanto as Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social (questões 4 e 5), tendo em vista que orienta para que os alunos pesquisem acerca de elementos históricos e éticos do trabalho científico, de modo a superar uma abordagem estritamente conceitual do tema. O quadro abaixo resume as RSC evidenciadas na obra.

Quadro 16 – Evidência das RSC em meio a CD18.06

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Apresenta o poema “Rosa de Hiroshima” que explicita a destruição nas cidades de Hiroshima e Nagasaki;
	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre os benefícios e malefícios das aplicações da energia nuclear; • Propõe que seja pesquisado os rumos das pesquisas nucleares durante e depois da Segunda Guerra Mundial;
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas	• Propõe que seja pesquisado sobre as ações e reações dos cientistas que participaram do PM antes e depois do lançamento das bombas;

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Propõe que seja pesquisado sobre as pessoas envolvidas no desenvolvimento das bombas e as razões que declararam, tanto de cientistas quanto líderes políticos;
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina, agricultura e para a produção de energia elétrica;

Fonte: autoria própria

4.1.7 CD18.07 - Guimarães, Piqueira e Carron (2016)

Por sua vez, a CD18.07 não aborda os saberes históricos relacionados ao processo de produção dos armamentos nucleares em meio a exposição dos conceitos, entretanto, podem ser evidenciadas questões e textos complementares sobre o tema.

Quanto às questões, observa-se que as de número 28 e 30, apesar de recorrerem a saberes históricos que contextualizam o tema, não questionam tais saberes, de modo que suas resoluções se limitam a saberes conceituais da física. Por sua vez, a questão de número 22 demanda que os estudantes saibam elementos históricos e políticos, ainda que bastante superficiais às discussões, como destacado abaixo.

Figura 35 – Questão que apresenta conteúdos históricos, evidenciada na CD 18.07

22. (Fuvest-SP) As bombas atômicas, lançadas contra Hiroshima e Nagasaki em 1945, resultaram na morte de aproximadamente 300 mil pessoas, vítimas imediatas das explosões ou de doenças causadas pela exposição à radiação. Esses eventos marcaram o início de uma nova etapa histórica na corrida armamentista entre as nações, caracterizada pelo desenvolvimento de programas nucleares com finalidades bélicas. Considerando essa etapa e os efeitos das bombas atômicas, analise as afirmações abaixo.

I. As bombas atômicas que atingiram Hiroshima e Nagasaki foram lançadas pelos Estados Unidos, único país que possuía esse tipo de armamento ao fim da Segunda Guerra Mundial.

II. As radiações liberadas numa explosão atômica podem produzir mutações no material genético humano, que causam doenças como câncer ou são transmitidas para a geração seguinte, caso tenham ocorrido nas células germinativas.

III. Desde o fim da Segunda Guerra Mundial, várias nações desenvolveram armas atômicas e, atualmente, entre as que possuem esse tipo de armamento, têm-se China, Estados Unidos, França, Índia, Israel, Paquistão, Reino Unido e Rússia.

Está correto o que se afirma em:

a) I, somente.
b) II, somente.
c) I e II, somente.
d) II e III, somente.
x e) I, II e III.

Fonte: Guimarães, Piqueira e Carron (2016, p. 246).

Quanto a questão de número 22 (Figura 36), nota-se a capacidade de propiciar discussões acerca das consequências sociais das pesquisas voltadas para a produção dos armamentos nucleares, tanto em relação aos impactos devido ao lançamento das bombas quanto aos desdobramentos que seguiram com o fim da Segunda Guerra Mundial.

No que diz respeito aos quadros complementares, foram encontrados dois quadros que apresentando informações acerca do tema. O primeiro deles, intitulado “Física explica”, apresenta o texto “Risco de acidente nuclear sempre vai existir”, no qual discute os benefícios da utilização da energia nuclear de modo a observar os riscos.

O segundo quadro, intitulado “Em Construção”, comenta a participação de Einstein ao assinar a carta encaminhada ao então presidente dos Estados Unidos, como visto na citação abaixo.

> Em 1939, Einstein assinou a carta ao presidente dos Estados Unidos Franklin Delano Roosevelt (1882-1945), redigida pelo físico húngaro Leo Szilard (1898-1964), sobre as implicações militares da energia nuclear. (GUIMARÃES, PIQUEIRA E CARRON, 2016, p. 217).

O texto aponta também que o cientista “em toda a sua vida, dedicou-se integralmente a causas pacifistas, tendo erguido sua voz contra o nazismo, o racismo e todas as formas de intolerância” (GUIMARÃES, PIQUEIRA E CARRON, 2016, p. 217).

Ao discutir as contribuições de Einstein ao projeto da bomba, tal como seus esforços em prol de causas pacifistas, a CD18.07 demonstra a complexidade da conjuntura histórica que motiva a tomada de decisões por parte dos cientistas, discutir estas influências pode contribuir para a desmistificação da concepção de neutralidade científica.

Por sua vez, no manual do professor, nota-se a preocupação em elucidar discussões que superem os conteúdos conceituais, afim de abarcar elementos como os riscos derivados do conhecimento científico e sua influência para a tomada de decisões, ao indicar que o capítulo destinado à física nuclear tem por objetivo:

> fornecer aos alunos subsídios para que possam emitir juízos próprios e exercer o direito de todo cidadão de avaliar prós e contras levando em conta que, se de um lado a energia nuclear melhora a qualidade

> de vida das pessoas, por outro lado ela traz riscos que precisam ser ponderados para um posicionamento responsável. (GUIMARÃES, PIQUEIRA E CARRON, 2016, p. 372).

Ainda no manual do professor, ao introduzir o capítulo destinado à Física Nuclear, é sugerido que sejam discutidas informações referentes ao contexto histórico. Para tanto, disponibiliza novas informações ao professor, fundamentais para compreender a extensão das pesquisas e suas consequências, evidenciadas no trecho abaixo.

> Em 1945, o mundo tomou conhecimento de uma das maiores atrocidades cometidas contra a humanidade: a explosão de bombas atômicas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão. Era a energia nuclear a serviço da intolerância. Esses eventos marcaram profundamente todos aqueles que direta ou indiretamente tiveram participação no Projeto Manhattan – programa nuclear americano – e, a partir deles, a energia nuclear passou a ser vista como sinônimo de destruição. (GUIMARÃES, PIQUEIRA E CARRON, 2016, p. 372).

Portanto, ao utilizar a CD18.07, é importante pensar a intencionalidade do professor afim de apresentar os conteúdos históricos relacionados ao PM, visto que as informações no livro do aluno não são apresentadas no texto central da obra. O quadro a seguir apresenta as RSC na obra.

Quadro 17 – Evidência das RSC em meio a CD18.07

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Apresenta uma descrição dos impactos causados nas cidades de Hiroshima e Nagasaki
	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Compara os perigos da exposição às radiações ionizantes com suas aplicações na medicina • Compara os benefícios da produção energética com os riscos de acidentes nucleares
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Faz alusão à carta de Einstein-Szilard ao presidente dos EUA
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: a medicina, a agricultura, a Indústria e a arqueologia

Fonte: autoria própria

4.1.8 CD18.08 - Biscuola et al. (2016)

No que diz respeito a CD18.08, foram observadas apenas duas breves menções à produção de armamentos nucleares.

Em um primeiro momento, ao explicitar a equivalência entre massa e energia, a obra menciona os processos nucleares indicando que a fusão nuclear, que ocorre no núcleo solar de modo a prover energia, “também ocorre na explosão de uma bomba de hidrogênio” (BISCUOLA ET AL., 2016, p. 273). Já no manual do professor, com intuito de reiterar a relevância da equação $E=mc^2$, Biscuola et al. (2016, p. 391) aponta que essa fórmula “guarda o princípio de funcionamento da bomba atômica”.

Portanto, nota-se que as menções realizadas por Biscuola et al. (2016) aos armamentos nucleares não permitem aprofundar as discussões em torno de elementos históricos e conceituais, tampouco relacionado às RSC, se tratando apenas de curiosidades relacionadas a aplicação tecnológica dos conceitos estudados.

Quadro 18 – Evidência das RSC em meio a CD18.08

Categorias	A obra apresenta...
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	Não foram encontradas discussões
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	Não foram encontradas discussões
Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos	Não foram encontradas discussões

Fonte: autoria própria

4.1.9 CD18.09 - Máximo e Alvarenga (2016)

Tal como a coleção anterior, a CD18.09 discute de maneira pontual os tópicos de interesse para esta pesquisa, sendo observado apenas uma menção, em meio a exposições sobre radiações gama, na qual problematiza o conhecimento sobre a radiação ao contrapor a ideia das explosões com as aplicações voltadas à área médica, como destacado a seguir.

> Apesar de ser conhecida por causa da explosão de bombas atômicas que foram jogadas em Hiroshima e Nagasaki, no Japão, durante a 2ª Guerra Mundial, atualmente a radiação γ é largamente empregada em Medicina Nuclear tanto para diagnóstico quanto para terapia. (MÁXIMO E ALVARENGA, 2016, p. 220).

Destaco que a obra não aborda conteúdos como a radioatividade e as reações nucleares, tópicos historicamente relacionados com o desenvolvimento dos armamentos nucleares, motivo que pode ter contribuído para a ausência do tema. O quadro abaixo apresenta uma posição discussão acerca das RSC.

Quadro 19 – Evidência das RSC em meio a CD18.09

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Compara a utilização da energia nuclear para a produção de armamentos nucleares com as aplicações na área médica

Fonte: autoria própria

4.1.10 CD18.10 - Gaspar (2016)

Por sua vez, a CD18.10 indica em sua apresentação que, além de entender os fenômenos físicos, os leitores irão “conhecer aspectos históricos de suas descobertas e dos cientistas que para elas contribuíram” (GASPAR, 2016, p. 3). O trecho demonstra uma preocupação da obra para com os conteúdos históricos e suas relações com os saberes estudados.

A primeira menção às bombas atômicas é observada em um quadro complementar, dentre as discussões sobre relatividade restrita. Ao apresentar o livro *A nova Física,* a obra descreve Otto Robert Frisch, como o, “físico austríaco que participou do projeto da construção da bomba atômica em Los Alamos” (GASPAR, 2016, p. 217).

Como apresentado no primeiro capítulo, Otto Frisch foi um dos principais pesquisadores a atuar em território britânico em prol do desenvolvimento de armamentos nucleares, contribuindo significativamente para o desenvolvimento científico do tema. Entretanto, apesar da citar o cientista, a obra não discute suas contribuições.

Ainda em meio as discussões voltadas ao estudo da teoria da relatividade, ao abordar o conceito de energia relativística, é dito que a expressão possui “um resultado estranho, mas incontestável, drasticamente comprovado pelas armas nucleares” (GASPAR, 2016, p. 225).

No capítulo seguinte, ao tratar sobre os neutrinos e a conservação de energia, observa-se um quadro complementar com uma breve biografia de Enrico Fermi, onde é realizada uma menção direta ao PM que destaca a importância do cientista como um dos líderes do projeto.

O texto alerta também para o fato de a descoberta da fissão nuclear ter ocorrido por físicos alemães, “o que tornava a Alemanha cada vez mais próxima de construir um artefato nuclear” (GASPAR, 2016, p. 262). Este contexto de conflito teria movido os cientistas a alertar o governo estadunidense sobre a necessidade de um programa nuclear e, mais tarde, ao desenvolvimento das bombas atômicas, como destacado abaixo.

> Alertado pelos próprios cientistas, entre eles Einstein e Fermi, o governo norte-americano iniciou o Projeto Manhattan com o mesmo objetivo. Em 16 de julho de 1945, sob a liderança teórica de Fermi, os Estados Unidos lançaram a primeira bomba atômica no deserto do Novo México. (p. 262).

Neste mesmo sentido, dentre as orientações do manual dos professores, é apresentada uma biografia mais detalhada de Albert Einstein, onde é colocado em evidencia sua participação política na instituição de um programa por armamentos nucleares.

> Sua última ação política ocorreu em 1939. Nesse ano, dois físicos húngaros, Leo Szilard (1898-1964) e Eugene Wigner (1902-1995), convenceram Einstein do perigo representado pelo progresso dos cientistas alemães na física nuclear, que poderia levar os nazistas à construção de uma bomba atômica. Einstein enviou uma carta ao presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt relatando esse perigo, o que levou os Estados Unidos ao desenvolvimento de um projeto para a construção da primeira bomba atômica. (GASPAR, 2016. p. 390)

Estas discussões evidenciam o contexto dos conflitos globais, que contribuíram para o desenvolvimento de pesquisas nucleares com fins bélicos,

discutir este contexto se mostra fundamental afim de reconhecer as influencias geopolíticas nos interesses científicos.

Quadro 20 – Evidência das RSC em meio a CD18.10

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Faz alusão à carta de Einstein-Szilard ao presidente dos EUA • Influência do regime nazista para o posicionamento dos cientistas a favor de um programa nuclear

Fonte: autoria própria

4.1.11 CD18.11 - Aurélio Filho e Toscano (2016)

Inicialmente, ao discutir a importância dos processos de fissão e fusão nuclear, a CD18.11 menciona a existência das bombas atômicas, de modo a disponibilizar uma imagem representando a destruição da cidade de Hiroshima (Figura 38).

Ainda na introdução do tema, são discutidas as influências para o direcionamento das pesquisas científicas através da importância do apoio financeiro para a efetivação das pesquisas. O trecho permite também discutir sobre as questões éticas do trabalho científico.

Figura 36 – Cidade de Hiroshima após o lançamento das bombas



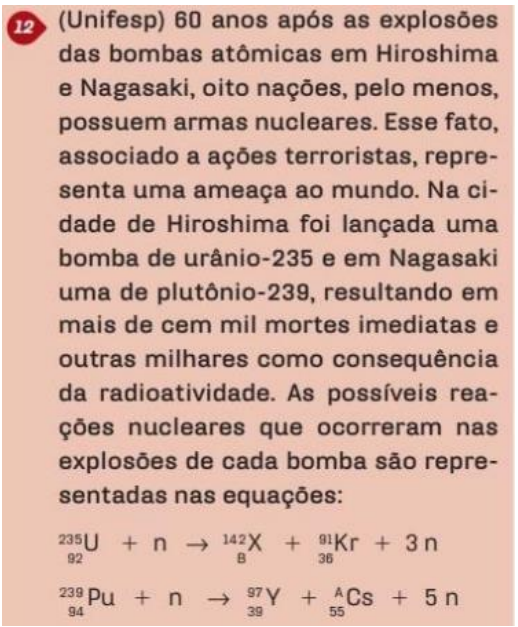
Fonte: Aurélio Filho e Toscano (2016, p. 202)

> A investigação do núcleo atómico em várias partes do mundo teve grande apoio financeiro: primeiro para fabricar as bombas, como as que os Estados Unidos lançaram sobre Hiroshima (com poder de

> destruição equivalente a 12000 toneladas de dinamite) e Nagasaki (22000 toneladas de dinamite), e, posteriormente, nos chamados 'tempos de paz', para construir reatores nucleares, utilizados em pesquisas e na geração de energia elétrica. (AURÉLIO FILHO E TOSCANO, 2016, p. 202).

São disponibilizadas ainda duas questões que evidenciam o contexto de produção e lançamento das bombas. A primeira trata sobre a dificuldade em produzir urânio enriquecido, mas ressalta que grande parte das bombas utilizam o plutônio, que é produzido no interior de reatores nucleares. Por sua vez, a questão seguinte relata a destruição das cidades de Hiroshima e Nagasaki, devido ao lançamento das bombas (Figura 39). Nota-se que, em ambas as questões, as informações são utilizadas apenas com intuito apenas de contextualizar os saberes investigados, de modo a não influenciar no processo de resolução.

Figura 37 – Questão que evidencia saberes históricos, presente na CD18.11



12 (Unifesp) 60 anos após as explosões das bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki, oito nações, pelo menos, possuem armas nucleares. Esse fato, associado a ações terroristas, representa uma ameaça ao mundo. Na cidade de Hiroshima foi lançada uma bomba de urânio-235 e em Nagasaki uma de plutônio-239, resultando em mais de cem mil mortes imediatas e outras milhares como consequência da radioatividade. As possíveis reações nucleares que ocorreram nas explosões de cada bomba são representadas nas equações:

$$^{235}_{92}U + n \rightarrow {}^{142}_{B}X + {}^{91}_{36}Kr + 3\,n$$

$$^{239}_{94}Pu + n \rightarrow {}^{97}_{39}Y + {}^{A}_{55}Cs + 5\,n$$

Fonte: Aurélio Filho e Toscano (2016, p. 212)

Por fim, no manual do professor, é sugerido que nos estudos sobre o fenômeno da Radioatividade, sejam apresentadas informações referentes à Segunda Guerra mundial, com destaque ao lançamento das bombas e as consequências da radiação na interação com o corpo humano.

Quadro 21 – Evidência das RSC em meio a CD18.11

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas.	• Apresenta Imagens de Hiroshima após os lançamentos das bombas • Disponibiliza uma questão que problematiza a existência de bombas nucleares
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas.	• Evidencia a necessidade de apoio financeiro para as pesquisas científicas

Fonte: autoria própria

4.1.12 CD18.12 - Sant'Anna et al. (2016)

Inicialmente, ao introduzir a unidade 4, que tem por objetivo discutir temas relacionado à FMC, é apresentado um texto denominado "O século XX: revoluções na Física", com intuito de descrever e discutir os avanços que culminaram com a Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica. Destaca-se a contraposição entre as diferentes formas de aplicação do conhecimento, como destacado abaixo.

> Einstein mostrou que era possível obter uma quantidade de energia gigantesca a partir da matéria, abrindo caminho para os processos de produção de energia nuclear. Infelizmente, todo esse novo conhecimento revelou também uma face assustadora, na forma de bombas atômicas. (SANT'ANNA et al., 2016, p. 229).

Mais à frente, em outro texto complementar, este intitulado "Equivalência entre massa e energia: a fissão e a fusão nuclear", após apresentar as reações nucleares, a obra menciona os reatores e as bombas atômicas, afim de exemplificar a aplicação do conceito, indicando que "Uma bomba de fissão, chamada bomba atômica, como as que foram detonadas em Hiroshima e Nagasaki em 1945, nada mais é que uma reação de fissão nuclear não controlada" (SANT'ANNA et al., 2016, p. 240).

Quanto às consequências sociais do trabalho científico, no manual do professor, é sugerido que ao tratar sobre o espectro eletromagnético, sejam discutidos os riscos gerados pela exposição às radiações. Para tanto, destaca

os episódios históricos de alta contaminação, dentre eles os bombardeiros de Hiroshima e Nagasaki, como descrito abaixo.

> Esses efeitos são provocados em situações de alta contaminação, como ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), quando os Estados Unidos lançaram bombas atômicas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, respectivamente, em 6 e 9 de agosto de 1945. (SANT'ANNA et al., 2016, p. 387).

Portanto, na CD18.12 os armamentos nucleares são apresentados apenas por meio de quadros complementares, além de ser indicado nas orientações aos professores como uma forma de demonstrar a existência de riscos sociais.

Quadro 22 – Evidência das RSC em meio a CD18.12

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Comenta sobre a contaminação radioativa nas cidades de Hiroshima e Nagasaki após as explosões nucleares
	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares

Fonte: autoria própria

4.2 PNLD (2021-2024)

4.2.1 CD21.01 - Mortimer et al. (2020)

A primeira obra pertencente ao PNLD 2021, direcionada a área de Ciências da Natureza e suas tecnologias, foi escrita por Mortimer et al. (2020) e publicada pela Editora Scipione, composta por seis volumes, evidenciados no quadro abaixo. Os temas de interesse para esta pesquisa foram encontrados apenas no volume 3.

Quadro 23 – Volumes que compõem a CD21.01

N° de ordem	Volume
1	Origens: o universo, a terra e a vida
2	Evolução, biodiversidade e sustentabilidade
3	Materiais, luz e som: modelos e propriedades
4	Materiais e energia: transformações e conservação
5	Desafios contemporâneos das juventudes
6	O mundo atual: questões sociocientíficas

Fonte: autoria própria

Em um primeiro momento, ao introduzir a unidade 3, intitulada “Radiações e aplicações”, a obra menciona as pesquisas realizadas durante a primeira metade do século XX, afim de comparar aplicações voltadas para a geração de energia elétrica e a criação de equipamentos hospitalares com o desenvolvimento de armamentos nucleares e os acidentes radiológicos.

Ao abordar as reações nucleares, menciona as bombas atômicas como uma possível aplicação do fenômeno. Ainda, ao introduzir o capítulo 9, dedicado aos “Efeitos biológicos das radiações e suas aplicações”, retoma as bombas atômicas como um modo negativo da aplicar os conceitos.

Durante o livro do aluno não são encontradas informações capazes de descrever o contexto histórico em questão, de modo a se referir apenas à existência de armamentos nucleares. Já no manual do professor, sugere a aplicação de estratégias interativas e contextualizadas ao trabalhar o tema.

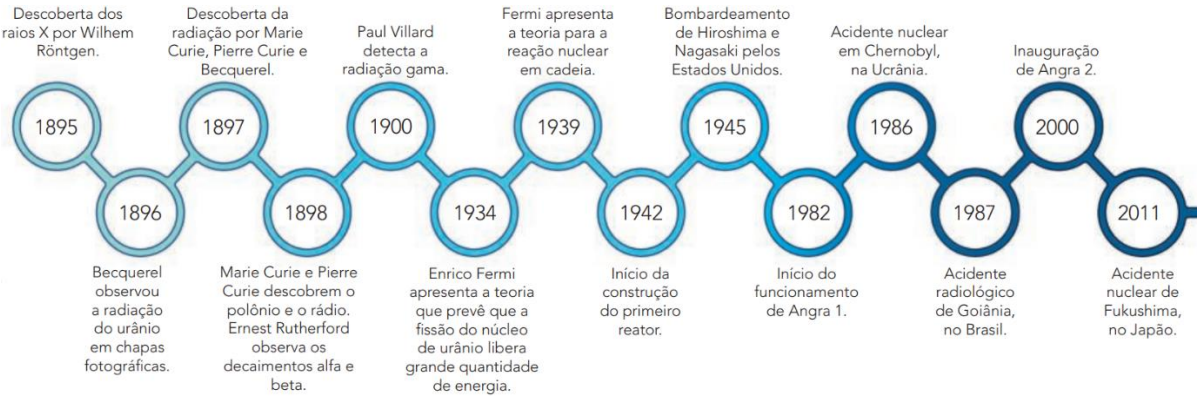
> Para abordar as aplicações da fissão nuclear, sugerimos estratégias interativas em parceria com a área de Ciências Humanas, como a simulação de um julgamento de um acontecimento histórico envolvendo a reação nuclear (por exemplo, o bombardeamento de Hiroshima e Nagasaki pelos Estados Unidos, os acidentes de Chernobyl, Fukushima ou do césio-137 em Goiânia, etc.). A turma pode ser organizada em grupos para pesquisar e defender diversas perspectivas acerca do assunto (posições contrárias ou a favor do uso, **da responsabilização** ou da investigação da energia nuclear no contexto determinado). (MORTIMER ET AL., 2020, p. 275, grifo nosso).

Orienta ainda para que seja realizada uma atividade na qual os estudantes devem “elaborar uma linha do tempo com os eventos que marcaram a história da radioatividade e da energia nuclear” (MORTIMER ET AL., 2020, p. 275). A figura 38 demonstra um exemplo disponibilizado pela obra.

Tais atividades podem fornecer informações importantes para discutir as consequências sociais do trabalho científico, tendo em vista que a pesquisa acerca do contexto de produção e lançamento dos armamentos nucleares pode suscitar discussões acerca destas consequências. Entretanto, as informações não se fazem presentes no livro do aluno, sendo necessário pesquisas em

fontes externas à obra, como outros materiais impressos ou no meio digital. O quadro a seguir resume as questões acerca das RSC evidenciadas na obra.

Figura 38 – Exemplo de linha do tempo com os principais episódios acerca da radioatividade



Fonte: Mortimer et al. (2020, p. 275)

Quadro 24 – Evidência das RSC em meio a CD21.01

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Orienta para a realização de atividades de pesquisa acerca da produção e lançamento das bombas
	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: usinas nucleares, da irradiação de alimentos e das aplicações médicas

Fonte: autoria própria

4.2.2 CD21.02 - Godoy, Dell'agnolo e Melo (2020)

A segunda obra pertencente ao PNLD 2021, escrita por Godoy, Dell'agnolo e Melo (2020) e publicada pela Editora FTD, também é composta por seis volumes, apresentados no quadro a seguir. Por sua vez, os temas de interesse foram encontrados apenas no volume 6 da coleção.

Quadro 25 – Volumes que compõem a CD21.02

N° de ordem	Volume
1	Matéria, energia e a vida
2	Movimentos e equilíbrios na natureza
3	Eletricidade na sociedade e na vida
4	Origens
5	Ciência, sociedade e ambiente
6	Ciência, tecnologia e cidadania

Fonte: autoria própria

Durante o volume 6, que tem por objetivo discutir a produção e aplicação do conhecimento científico, são notadas diversas menções ao desenvolvimento de armas nucleares, especificamente na Unidade 3, dedicada a trabalhar aspectos da química contemporânea.

Inicialmente, durante o primeiro tema, “Princípios de Radioatividade”, é disponibilizado um texto intitulado “História da Radioatividade”, no qual cita alguns cientistas e suas contribuições para o tema, dentre eles: Wilhelm Röntgen, Antoine Henri Becquerel, Marie Sklodowska Curie, Pierre Curie, Ernest Rutherford, Enrico Fermi, Otto Frisch, Lise Meitner e Otto Hahn.

No último tópico desta linha do tempo, o texto descreve a produção de armamentos nucleares e a destruição das cidades de Hiroshima e Nagasaki, seguido de uma ilustração da bomba *Little Boy*, como evidenciado abaixo.

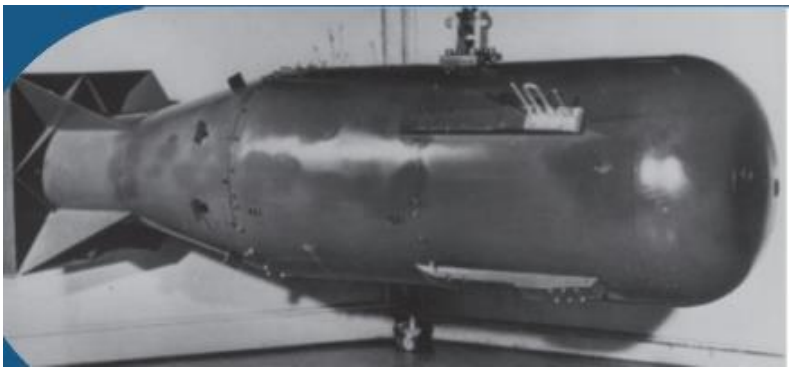
> Em 1939, uma sucessão de atos que envolviam a segunda guerra mundial culmina com o desenvolvimento do chamado “Projeto Manhattan” pelo governo dos Estados Unidos. O objetivo de tal projeto era o de desenvolver e construir armas nucleares. Em 16 de julho de 1945, a primeira bomba atômica foi detonada no estado do Novo México. No mesmo ano, no dia de 6 de agosto de 1945, o lançamento de uma bomba atômica sobre a cidade de Hiroshima, Japão, matou 90 mil pessoas no mesmo dia. Milhares morreram posteriormente devido aos efeitos da radiação. Três dias depois, outra bomba nuclear foi solta na cidade de Nagasaki, Japão, e 40 mil pessoas morreram no dia. Milhares faleceram depois pelos efeitos radioativos. (GODOY, DELL’AGNOLO E MELO, 2020, p. 99).

Após a exposição da linha do tempo, é dito que apesar das consequências negativas, quando associadas a pensamentos éticos e responsáveis, as pesquisas “permitem seu uso de maneira pacífica, gerando benefícios em diversas áreas” (GODOY, DELL’AGNOLO E MELO, 2020, p. 99). De acordo a obra, o tópico tem como objetivo trabalhar a valorização dos

conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico para a explicação da realidade (GODOY, DELL'AGNOLO E MELO, 2020, p. 230).

Nota-se que, no manual do professor, é orientado que para a introdução do tema seja discutido o fato de a radioatividade ter sido utilizada para "expressar relações de poder entre os países", (GODOY, DELL'AGNOLO E MELO, 2020, p. 233).

Figura 39 – Réplica da bomba atômica *Little boy* lançada em Hiroshima, Japão, em 1945



Fonte: Godoy, Dell'agnolo e Melo (2020, p. 99)

Na página seguinte, dentre as atividades propostas, observa-se a questão 4, que se direciona ao contexto de produção dos armamentos e suas implicações sociais, como evidenciado na figura abaixo.

Figura 40 – Atividade acerca das aplicações das reações nucleares

4. Qual sua opinião sobre a utilização das reações nucleares para a produção de armas? Elas seriam consideradas tecnologias de defesa ou de ataque? Converse com seus colegas sobre a questão. Se necessário, realize uma pesquisa sobre Hiroshima e Nagasaki, cidades japonesas atingidas por bombas atômicas durante a Segunda Guerra Mundial. Anote a conclusão de sua conversa no caderno.

Fonte: Godoy, Dell'agnolo e Melo (2020, p. 100)

Assim, tanto a linha do tempo quanto a atividade proposta permitem evidenciar aspectos das consequências sociais do trabalho científico e da necessidade de pensar tais consequências. Dentre estas discussões, é

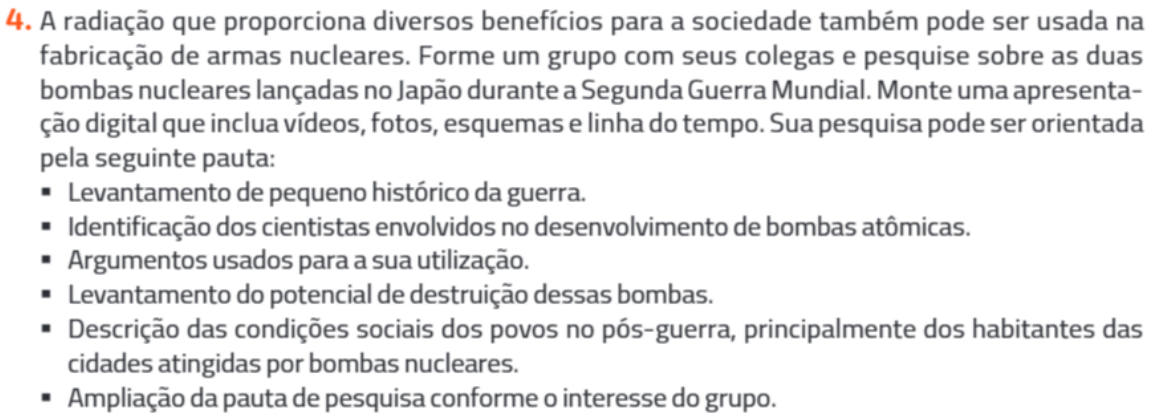
importante observar que as menções ao contexto de produção e lançamento das bombas e as consequências para as cidades atingidas são importantes como meio de caracterizar e contextualizar tais consequências. Ainda, as comparações entre as aplicações “positivas” e “negativas” permitem discutir os diferentes modos de se aplicar um mesmo saber científico.

No tema seguinte, sobre Reações nucleares, a obra menciona as bombas como forma de aplicação dos conceitos de fissão e fusão nuclear. Sugere ainda que os alunos assistam a um vídeo intitulado “A bomba H”, que compara a energia liberada pelos diferentes tipos de reações nucleares.

> Tanto a fissão quanto a fusão nuclear já foram utilizadas na produção de bombas atômicas. A fissão nuclear foi o princípio adotado para a produção das bombas lançadas em Hiroshima e Nagasaki durante a Segunda Guerra Mundial. A fusão nuclear foi usada na produção da bomba H, lançada em testes. (GODOY, DELL’AGNOLO E MELO, 2020, p. 105).

No próximo tema, dedicado exclusivamente a discutir as aplicações tecnológicas da Radioatividade, pode ser observada uma atividade de pesquisa que retoma a questão histórica das armas nucleares, apresentada a seguir.

Figura 41 – Atividade que explicita pautas de pesquisa acerca dos acontecimentos históricos envolvendo a produção de armas nucleares



4. A radiação que proporciona diversos benefícios para a sociedade também pode ser usada na fabricação de armas nucleares. Forme um grupo com seus colegas e pesquise sobre as duas bombas nucleares lançadas no Japão durante a Segunda Guerra Mundial. Monte uma apresentação digital que inclua vídeos, fotos, esquemas e linha do tempo. Sua pesquisa pode ser orientada pela seguinte pauta:

- Levantamento de pequeno histórico da guerra.
- Identificação dos cientistas envolvidos no desenvolvimento de bombas atômicas.
- Argumentos usados para a sua utilização.
- Levantamento do potencial de destruição dessas bombas.
- Descrição das condições sociais dos povos no pós-guerra, principalmente dos habitantes das cidades atingidas por bombas nucleares.
- Ampliação da pauta de pesquisa conforme o interesse do grupo.

Fonte: Godoy, Dell’agnolo e Melo (2020, p. 119)

De acordo com os autores, a atividade tem como objetivo fazer os alunos avaliarem “as aplicações do conhecimento científico em situações controversas das Ciências da Natureza e suas Tecnologias, no caso, o uso de bombas nucleares” (GODOY, DELL’AGNOLO E MELO, 2020, p. 232). Dentre

estas discussões, nota-se uma oportunidade de trabalhar tanto as responsabilidades acerca das implicações sociais do saber, quanto os meios de aplicação destes saberes.

Por fim, no manual do professor, é orientado que, caso haja interesses dos alunos acerca do tema, seja indicada a leitura do texto “A radioatividade e a História do tempo presente”, escrito por Merçon e Quadrat (2004) e publicado na revista Química nova na escola. No texto são explicitadas as relações entre ciência e sociedade a partir do desenvolvimento histórico das pesquisas dedicadas à energia nuclear e suas aplicações, possibilitando pensar como estas aplicações foram apropriadas pela sociedade e o modo como modificaram as dimensões políticas e econômicas.

Quadro 26 – Evidência das RSC em meio a CD21.02

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas.	• Apresenta uma descrição dos impactos dos lançamentos sob as cidades de Hiroshima e Nagasaki; • Uso da radioatividade para expressar relações de poder a partir das explosões nucleares; • Questões acerca dos desdobramentos após a produção e uso das bombas;
	2	a possibilidade de se utilizar o saber científico tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais.	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares; • Comparações entre os benefícios e malefícios das aplicações do fenômeno da Radioatividade;
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas.	• Atividade de pesquisa acerca do contexto histórico antes e durante a realização do PM;
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina nuclear, produção de energia elétrica, arqueologia, agricultura, indústria.

Fonte: autoria própria

4.2.3 CD21.03 - Lopes e Rosso (2020)

A terceira obra, direcionada a área de Ciências da Natureza e suas tecnologias, foi escrita por Lopes e Rosso (2020) e publicada pela Editora Moderna, também composta por seis volumes. Os temas de interesse foram encontrados tanto no volume 2 quanto no volume 3.

Quadro 27 – Volumes que compõem a CD21.03

N° de ordem	Volume
1	Evolução e Universo
2	Energia e Consumo sustentável
3	Água, Agricultura e Uso da terra
4	Poluição e Movimento
5	Corpo humano e Vida saudável
6	Mundo tecnológico e Ciências aplicadas

Fonte: autoria própria

Durante o volume 2, que tem como objetivo discutir a questão energética a partir da sustentabilidade, é observada uma menção aos armamentos nucleares durante a exposição do primeiro tema, denominado “Consumo e ambiente”, que tem por objetivo discutir os efeitos das intervenções humanas no meio ambiente.

> Não podemos deixar de considerar a poluição decorrente da explosão de artefatos nucleares, como as bombas A, ou termonucleares, como as bombas H. A poeira radioativa que resultaria dessa explosão seria levada pelo vento e pelas águas, disseminando a contaminação e com possíveis consequências em escala planetária. (LOPES E ROSSO, 2020, p. 86).

O trecho busca discutir as consequências socioambientais de uma explosão nuclear, tendo em vista a emissão de partículas radioativas. Nota-se a possibilidade de utilizar as informações para problematizar os testes nucleares realizados na segunda metade do século XX, vinculadas a aspectos políticos e econômicos.

Já no volume 3, em meio a unidade 2, com objetivo de discutir a produção e conservação de alimentos, o terceiro tema dedica-se inteiramente à Física nuclear, no qual pode ser notada uma menção aos armamentos nucleares afim de compara-los com a tecnologia dos reatores nucleares.

> Quando a reação de fissão é usada para fins bélicos, como as bombas nucleares detonadas em Hiroshima e Nagasaki, no Japão,

> em 1945, não há controle das reações. (LOPES E ROSSO, 2020, p. 110).

Por sua vez, no manual do professor, é orientado que, ao indicar as aplicações das reações nucleares, “Mencione as bombas lançadas nas cidades de Hiroshima e Nagasaki (Japão), pelos Estados Unidos, em agosto de 1945, durante a Segunda Guerra Mundial” (LOPES E ROSSO, 2020, p. LVIII).

Quanto às orientações ao tema 5, “Equilíbrio químico e a produção de fertilizantes nitrogenados”, a ser trabalhado pelo professor do componente curricular química, a obra propõe uma abordagem a partir da História e Filosofia da Ciência, de modo a trabalhar as contribuições de Fritz Haber no programa de guerra alemão durante a Primeira Guerra Mundial.

Neste sentido, propõe que seja realizada uma atividade de pesquisa em grupo, na qual os alunos deverão refletir acerca dos tópicos: “O processo produtivo Haber-Bosch”; “A desvalorização da participação feminina na Ciência” e a “Ciência como construção social”. Para tanto, sugere que o professor faça questões aos alunos, dentre as quais, destacam-se:

> se outros cientistas já participaram ou se recusaram a participar de programas de guerra; se seria ético um cientista utilizar seu conhecimento no desenvolvimento de armas letais; [...] o que se espera de um cientista em tempos de guerra (LOPES E ROSSO, 2020, p. LXVI).

Nota-se que as questões propostas permitem refletir acerca da neutralidade do conhecimento científico, tal como das atitudes dos cientistas frente a temas controversos ou sobre as aplicações desenvolvidas para os conflitos, de modo a evidenciar aspectos das RSC.

Quadro 28 – Evidência das RSC em meio a CD21.03

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Consequências socioambientais das explosões nucleares;
	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares; • Comparações entre os benefícios e malefícios das radiações ionizantes;

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas	• Questiona a atitude de cientistas em participar ou não de programas de guerra;
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: radioterapia, irradiação de alimentos e reatores nucleares;

Fonte: autoria própria

4.2.4 CD21.04 - Amabis et al. (2020)

A quarta obra do PNLD 2021, pertencente à área de Ciências da Natureza e suas tecnologias foi escrita por Amabis et al. (2020) e publicada pela Editora Moderna, e é composta pelos. Os temas de interesse encontram-se nos volumes 1 e 6.

Quadro 29 – Volumes que compõem a CD21.04

N° de ordem	Volume
1	O conhecimento científico
2	Água e vida
3	Matéria e energia
4	Humanidade e ambiente
5	Ciência e tecnologia
6	Universo e evolução

Fonte: autoria própria

No primeiro volume da coleção, que tem como objetivo trabalhar a natureza do fazer científico ao apresentar as características, aplicações e possibilidades dos métodos científicos, a existência das bombas atômica é mencionada em meio a exposição de um debate em uma rede social, como reproduzido abaixo. Em resposta, outro usuário destaca desenvolvimentos tecnológicos considerados por ele como positivos, como as tecnologias da comunicação e a prevenção de doenças como a poliomielite e a varíola.

> a Ciência dizia que no século XXI muita coisa seria diferente, mas tenho a impressão de que tudo piorou: só se produziram mais armas, cada vez melhores. Basta lembrar que a Ciência criou a bomba atômica!" (AMABIS ET AL., 2020, p. 13).

O trecho tem como objetivo problematizar possíveis visões reduzidas do trabalho científico, que não consideram os procedimentos acadêmicos e as diferentes naturezas de aplicação do conhecimento.

Como forma de combater estas concepções, a obra propõe que os alunos se reúnam em grupos e entrevistem pessoas mais velhas, afim de responder se “As Ciências Naturais e a tecnologia provocam grandes impactos na vida das pessoas” de modo a “refletir sobre como seria nossa vida sem os avanços tecnológicos e avaliando os impactos positivos e negativos desse desenvolvimento” (AMABIS ET AL., 2020, p. 13). Nota-se que a atividade pode ser utilizada para discutir o modo como a ciência modifica e é modificada pela sociedade.

Por sua vez, no volume 6, voltado a discussões acerca da origem do Universo, da formação de estrelas e planetas e da evolução da vida na Terra, notam-se diversas menções aos armamentos nucleares e aos impactos destes artefatos na sociedade, especialmente ao trabalhar a FMC.

Inicialmente, em um tópico denominado “Noções de física nuclear”, as bombas nucleares são mencionadas como forma de contextualizar as aplicações do saber, como destacado abaixo. Assim como na CD18.05, é dito que a fabricação da bomba atômica “foi só uma questão de tempo” após a construção do primeiro reator nuclear, também ignorando as pesquisas e os avanços científicos e tecnológicos alcançados no âmbito do PM.

> Na primeira metade do século XX, a Física nuclear teve enorme desenvolvimento, exercendo notável influência científica, social e tecnológica sobre a humanidade. (AMABIS ET AL., 2020, p. 102).

Já no capítulo 11, dedicado ao fenômeno da Radioatividade, após explicar a reação de fissão nuclear e o conceito de massa crítica, é dito que com “o início da Segunda Guerra Mundial, os interesses sobre fissão nuclear aumentaram devido a possível aplicação bélica” (AMABIS ET AL., 2020, p. 137), o que demonstra a potencialização das pesquisas devido a motivações políticas para o uso das novas tecnologias na guerra.

> Cada uma das bombas detonadas no Japão correspondia a cerca de 20 quilotons (um quiloton equivale ao poder destrutivo de mil toneladas de TNT). Aproximadamente 71 mil pessoas foram mortas instantaneamente em Hiroshima. As mortes nos cinco anos subsequentes, em decorrência da exposição à radiação, são estimadas em 200 mil. Quase 98% das construções de Hiroshima foram destruídas ou seriamente danificadas. Em Nagasaki, algo em

> torno de 74 mil pessoas morreram na explosão, que devastou 47% da cidade. Foi devido a essa lamentável demonstração que o mundo tomou conhecimento da enorme quantidade de energia que se encontra armazenada no núcleo dos átomos. (AMABIS ET AL., 2020, p. 137).

Figura 42 – Ruínas de Hiroshima cerca de um mês após as explosões



Fonte: AMABIS ET AL. (2020, p. 137)

No tópico seguinte, “Estrelas e bombas de hidrogênio”, a partir do processo de fusão nuclear, as bombas termonucleares são mencionadas, entretanto, diferente das discussões acerca da bomba atômica, não são apresentados elementos do processo histórico de produção das bombas.

Por fim, no quadro complementar “em destaque”, é apresentado o texto “Controvérsias sobre o uso das tecnologias nucleares”, no qual propõe uma atividade de pesquisa sobre as catástrofes envolvendo as tecnologias nucleares, dentre elas estão as “Consequências biológicas e psicológicas, ao longo dos anos, para os sobreviventes da explosão das bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki” (AMABIS ET AL., 2020, p. 139). De acordo com o livro, a atividade tem como objetivo possibilitar ao aluno “refletir sobre implicações benéficas e maléficas para a sociedade e a se posicionar sobre eles” (AMABIS ET AL., 2020, p. 139).

Figura 43 – Explosão da primeira bomba de hidrogênio testada, em 1952, no Atol Eniwetok



Fonte: AMABIS ET AL. (2020, p. 139)

Entendo que a realização desta atividade permite discutir elementos relacionados às Responsabilidades de refletir acerca das consequências da pesquisa, tanto acerca das implicações sociais, ao discutir a destruição causada nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, quanto sobre as diferentes formas de se aplicar o saber científico.

A obra sugere também que, em caso de interesse por parte dos estudantes, seja realizada uma roda de conversa acerca do potencial destrutivo das bombas atômicas, e "Se julgar pertinente, realize uma atividade interdisciplinar com os professores de História e Filosofia, para abordar os impactos sociais e políticos das guerras nucleares" (AMABIS ET AL., 2020, p. LXVI). Assim, a atividade também possibilita discutir aspectos das RSC, tendo em vista os impactos socais do trabalho científico.

Quadro 30 – Evidência das RSC em meio a CD21.04

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Atividade em grupo "As Ciências Naturais e a tecnologia provocam grandes impactos na vida das pessoas"; • Descreve os impactos dos lançamentos sob as cidades de Hiroshima e Nagasaki; • Proposta de atividade interdisciplinar para abordar os impactos sociais e políticos das guerras nucleares;

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Debate nas redes sociais que evidenciam diferentes maneiras de se aplicar o conhecimento científico; • Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares;
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Explicita os interesses políticos acerca da produção de novas tecnologias bélicas;
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: produção de energia elétrica, aplicações médicas e arqueologia;

Fonte: autoria própria

4.2.5 CD21.05 – Fukui et al. (2020)

A obra de número 5, escrita por Fukui et al. (2020) e publicada pela Editora SM, também é composta por seis volumes, e apresenta os temas de interesse para esta pesquisa apenas no volume 1, que tem por objetivo abordar a composição da matéria.

Quadro 31 – Volumes que compõem a CD21.05

N° de ordem	Volume
1	Composição e estrutura dos corpos
2	Matéria e transformações
3	Energia e transformações
4	Evolução, tempo e espaço
5	Ambiente e ser humano
6	Vida, saúde e genética

Fonte: autoria própria

No capítulo 4, voltado ao estudo da Física Nuclear, ao trabalhar conceitos como radioatividade e radiação, é mencionado o imaginário do público acerca das aplicações destes conceitos, de modo que “são frequentemente associadas a armas, como a bomba atômica” (FUKUI ET AL., 2020, p. 52). A explicitação é feita afim de comparar com outras aplicações, vistas como benéficas para a sociedade, como o campo da medicina nuclear e a utilização na agricultura.

Ao fim do capítulo é apresentada uma atividade de prática em ciências, com objetivo de trabalhar os tópicos relacionados à radioatividade. Para tanto

pede para que os alunos pesquisem acerca de temas que consideram atrativos ao público, dentre eles a “fabricação de bombas atômicas”.

Ao final da atividade, a obra apresenta a seguinte questão: “A divulgação científica também é uma forma de popularização da ciência. Na opinião de vocês, por que ela é importante para a sociedade?” (FUKUI ET AL., 2020, p. 57). É esperado que os alunos:

> concluam que a divulgação científica é importante para conectar a população em geral com a comunidade científica. Assim, é possível que o público não especialista saiba o que está sendo desenvolvido pelos cientistas. Além disso, a popularização da ciência pode evitar prejuízos, por exemplo, à saúde pública, pela divulgação de crenças populares que não correspondem aos conhecimentos científicos aceitos atualmente. (FUKUI ET AL., 2020, p. 203)

A questão pode ser utilizada afim de realizar discussões acerca da responsabilidade dos cientistas em comunicar e aconselhar o público e os governos, de modo que o diálogo entre ciência e sociedade resulte na construção de uma comunidade capaz de avaliar os saberes científicos e tomar decisões voltadas aos interesses coletivos quanto ao direcionamento das pesquisas.

A obra sugere que a introdução do capítulo seja realizada a partir de questões aos alunos, tendo como exemplo: “O que vocês sabem sobre as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki, no Japão, durante a Segunda Guerra Mundial?” (FUKUI ET AL., 2020, p. 199).

É apresentada também uma atividade complementar, com orientações para um trabalho interdisciplinar. Na qual é solicitado que os alunos, em grupo, investiguem acerca de temas pertencentes à área, dentre eles destacam-se os temas 9 e 10, referentes a Bomba atômica (fissão nuclear) e a Bomba de hidrogênio (fusão nuclear), respectivamente. Para cada tema são apresentados tópicos essenciais, dos quais:

> Para os temas 9 e 10: Qual é a evolução histórico-científica da construção das bombas atômica e de hidrogênio? Como foram os testes com essas bombas nos Estados Unidos e quais foram seus efeitos? Como é o funcionamento interno de uma bomba atômica? O que são fissão e fusão nucleares? O que é massa crítica e subcrítica? Em que contexto histórico se deu o lançamento das bombas em

> Hiroshima e Nagasaki? Quais foram os efeitos sobre as cidades japonesas? O que é a bomba H? Qual é o atual panorama mundial quanto às armas nucleares? (FUKUI ET AL., 2020, p. 200).

Nota-se que são evidenciados tanto elementos voltados à HFSC quanto a aspectos conceituais da construção das bombas. Entendo que a pesquisa tem potencial de trabalhar elementos relacionados às consequências sociais do trabalho científico, tendo em vista que questiona os efeitos causados pelos lançamentos das bombas às cidades de Hiroshima e Nagasaki.

Quadro 32 – Evidência das RSC em meio a CD21.05

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Atividade complementar que propõe uma pesquisa acerca do processo de produção dos armamentos nucleares e das consequências às cidades atingidas.
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina, agricultura, indústria, geologia e arqueologia;
Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos	8	a importância de se tornar usual o diálogo entre os cientistas e a sociedade em geral	• Atividade de pesquisa voltada a discutir a importância da divulgação científica e seus efeitos para a tomada de decisão.

Fonte: autoria própria

4.2.6 CD21.06 - Thompson et al. (2020)

A sexta obra da área de Ciências da Natureza e suas tecnologias do PNLD 2021, foi escrita por Thompson et al. (2020) e publicada pela Editora Moderna, composta por seis volumes (quadro 33). Os temas de interesse foram encontrados nos volumes 3 e 6.

Quadro 33– Volumes que compõem a CD21.06

N° de ordem	Volume
1	Matéria e energia
2	Energia e ambiente
3	Saúde e tecnologia
4	Conservação e transformação
5	Terra e equilíbrios
6	Universo, materiais e evolução

Fonte: autoria própria

No volume 3, que tem por objetivo trabalhar tópicos voltados à área da saúde de modo a observar as aplicações tecnológicas na medicina, nota-se um capítulo intitulado “Ondas eletromagnéticas e a Medicina”, no qual discute fenômenos como a radioatividade e as reações nucleares.

Durante a exposição do tópico “Os cuidados com a radioatividade”, no qual é apresentada a definição do conceito e as propriedades das radiações emitidas, os armamentos nucleares são citados como modo de contrapor as aplicações benéficas para a área da medicina, afim de evidenciar aplicações de naturezas distintas, destacado no trecho a seguir.

> A radioatividade também permitiu a criação de armamentos nucleares com alta capacidade de destruição, como as bombas atômicas que explodiram nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, ao final da Segunda Guerra Mundial. Discutiremos esses dois aspectos da chamada energia nuclear (produção de energia e armamentos) adiante. (THOMPSON ET AL., 2020, p. 144).

No tópico seguinte, denominado “Tipos de Reações nucleares” ao abordar a reação em cadeia durante a fissão nuclear, a obra compara os processos que ocorrem durante a explosão de uma bomba atômica ao modo de funcionamento de um reator nuclear, evidenciando a diferença no controle das reações. As discussões são acompanhadas da imagem de uma explosão nuclear, retratada na figura abaixo.

Figura 44 – Explosão nuclear realizada durante um exercício nuclear em Mururoa



Fonte: Thompson et al. (2020, p. 148)

Por sua vez, ao abordar o processo de fusão nuclear, a coleção apresenta o funcionamento de uma bomba de hidrogênio, de modo a compara-

las com as bombas atômicas. Entretanto, não foram evidenciadas discussões acerca dos saberes históricos.

Por fim, cabe destacar a recomendação de leitura do livro *Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos* que, de acordo com a CD21.06, “permitirá ao estudante descobrir como o físico estadunidense, Robert Oppenheimer desenvolveu a bomba atômica e quais os dilemas morais com que lidou ao produzi-la” (THOMPSON ET AL., 2020, p. 160). Nota-se que o foco ao modo como o cientista agiu em relação aos dilemas morais permite pensar as maneiras como os cientistas lidam com as consequências de suas pesquisas, compreendendo um meio de trabalhar as RSC.

Já no volume 6, que tem por objetivo discutir temas relacionados ao universo e ao meio ambiente, nota-se um quadro complementar com o texto “Politetrafluoroetileno: da bomba atômica para a frigideira”, que discute o processo de descoberta do composto Politetrafluoroetileno, em 1938, e o modo como este material foi utilizado para a produção da bomba atômica.

> Apesar dessas propriedades incomuns que provocaram interesse, provavelmente, se não fosse a Segunda Guerra Mundial, a curto prazo nada teria sido feito com o novo polímero, já que se tratava de um produto caro. No entanto, poucos meses após essa descoberta, os cientistas que trabalhavam na criação da primeira bomba atômica precisaram de um material para as juntas de vedação que resistisse a um gás extremamente corrosivo – o hexafluoreto de urânio, UF6. Esse material era usado para enriquecer o urânio, de modo a obter o isótopo U-235, usado na bomba atômica. (THOMPSON ET AL., 2020, p. 56).

O texto indica também que, durante a guerra, o composto “foi transformado em juntas de vedação e válvulas, que se mostram resistentes ao composto corrosivo de urânio”, contudo, “a maioria das pessoas só soube de sua existência e de suas aplicações após o término do confronto” (THOMPSON ET AL., 2020, p. 56). Portanto, notam-se elementos que evidenciam a influência das dimensões políticas e econômicas no trabalho científico, dada a capacidade de direcionar recursos para áreas determinadas, de modo a potencializar as pesquisas que atendam aos interesses políticos de um período. O quadro abaixo sintetiza as RSC evidenciadas na coleção.

Quadro 34 – Evidência das RSC em meio a CD21.06

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre o fenômeno da fissão em reatores e em armamentos nucleares;
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas	• Recomendação de Leitura do livro Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos.
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Influência de interesses econômicos e políticos na produção de Politetrafluoroetileno para a utilização nas bombas;
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina, agricultura e a produção de energia elétrica;

Fonte: autoria própria

4.2.7 CD21.07 - Santos et al. (2020)

Por fim, a última coleção do PNLD 2021, dedicada à área de Ciências da Natureza e suas tecnologias, foi escrita por Santos et al. (2020) e publicada pela Editora Moderna. Os temas de interesse para esta pesquisa foram encontrados apenas no volume 1.

Quadro 35 – Volumes que compõem a CD21.07

N° de ordem	Volume
1	O universo da ciência e a ciência do universo
2	Vida na terra: como é possível?
3	Terra: um sistema dinâmico de matéria e energia
4	Energia e sociedade: uma reflexão necessária
5	Ser humano: origem e funcionamento
6	Ser humano e meio ambiente: relações e consequências

Fonte: autoria própria

Ao introduzir a primeira unidade da obra, as bombas atômicas são mencionadas em contraposição a aplicações médicas das pesquisas acerca do fenômeno da radioatividade, evidenciando a destruição das cidades de Hiroshima e Nagasaki e a magnitude dos danos causados.

Na página seguinte, são apresentadas três questões introdutórias ao conteúdo a ser trabalhado, das quais a primeira busca compreender, na opinião dos estudantes, “como a Ciência influencia a sociedade e como a

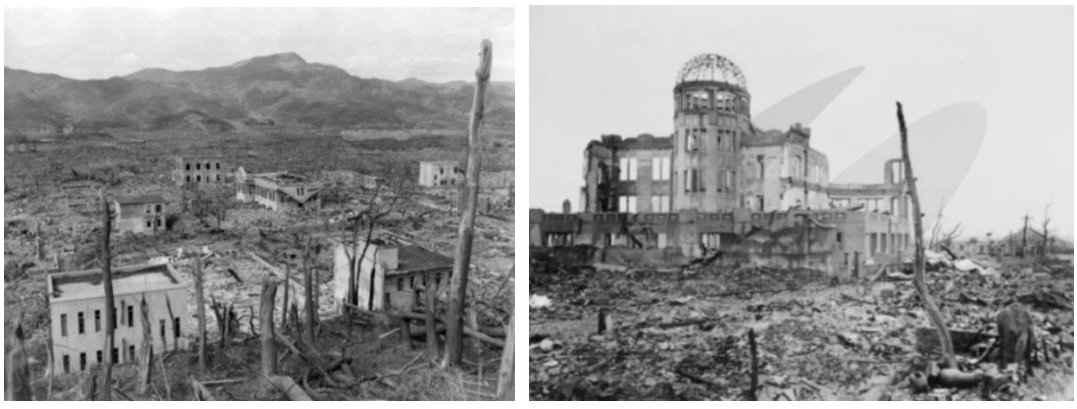
sociedade influencia a Ciência?" (SANTOS ET AL., 2020, p. 12). Deste modo, nota-se que, durante esta introdução, são disponibilizadas discussões capazes de contribuir para os questionamentos acerca das consequências sociais das pesquisas, assim como a respeito da neutralidade do trabalho científico.

Já no final da unidade é apresentado um quadro complementar com o texto "Desenvolvimento da bomba atômica", que tem por objetivo "refletir e discutir sobre a ética na aplicação dos conhecimentos científicos" e também "Analisar as consequências benéficas e maléficas das pesquisas científicas" (SANTOS ET AL., 2020, p. XLVI).

De início, o texto menciona a carta assinada por Einstein a pedido de Szilard, em 1939, com objetivo de informar o governo estadunidense sobre os avanços científicos da Alemanha nazista, de modo que "foi o medo de que os nazistas conseguissem desenvolver armas nucleares antes das demais nações que fez Einstein assinar a carta" (SANTOS ET AL., 2020, p. 28).

Na sequência, indica o início das atividades do PM, com a participação de diversos físicos notáveis, dentre eles: Julius Robert Oppenheimer, Arthur Compton, Richard Feynman, Enrico Fermi, James Chadwick, Niels Bohr e Leo Szilard. Por fim, comenta o posicionamento de "diversos cientistas" após os lançamentos, dentre os quais apenas Einstein é diretamente mencionado.

Figura 45 – Ruínas das cidades de Hiroshima (à direita) e Nagasaki (à esquerda) após os bombardeios com bombas atômicas em 1945



Fonte: Santos et al. (2020, p. 29)

> Após observarem o poder de destruição das bombas atômicas em testes e bombardeios, diversos cientistas se posicionaram contra o

> uso desse tipo de armamento, inclusive os que trabalharam no desenvolvimento das bombas. (SANTOS ET AL., 2020, p. 29).

Após o texto, são apresentadas três questões aos estudantes sobre o episódio histórico, todas capazes de promover discussões acerca das RSC. A primeira delas pede para que o estudante “Comente os efeitos causados na sociedade pela aplicação do conhecimento científico”. De acordo com a obra:

> Espera-se que os estudantes comentem que as pesquisas sobre as reações nucleares, assim como outros tipos de pesquisa, proporcionaram benefícios para a sociedade, como uma nova fonte de energia, mas também possibilitaram desenvolver armamentos com grande poder de destruição. (SANTOS ET AL., 2020, p. XLVI).

Entendo que a pergunta compreende a primeira e segunda questão do quadro 10, no que diz respeito às Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa, de modo que possibilita pensar as consequências sociais, mas também a possibilidade de pensar a naturezas das aplicações científicas.

Por sua vez, a segunda pergunta refere-se ao modo como o estudante percebe “a influência do contexto histórico na condução das pesquisas científicas” (SANTOS ET AL., 2020, p. 28). Neste caso, é esperado que:

> os estudantes percebam que o contexto histórico da época, a Segunda Guerra Mundial, direcionou diversas pesquisas científicas para o desenvolvimento de armamentos mais eficazes, como o Projeto Manhattan. (SANTOS ET AL., 2020, p. XLVI).

Nota-se, portanto, que a questão se refere a influências sociais que direcionam as pesquisas científicas, de modo a evidenciar a influência do contexto histórico para a efetivação das pesquisas do PM.

Por fim, a terceira questão refere-se à ética na prática científica, solicitando para que os alunos montem apresentações afim de responder “o que é ética, seu uso no desenvolvimento científico e quais cuidados a sociedade deve ter na aplicação e na divulgação do conhecimento científico” (SANTOS ET AL., 2020, p. 29).

Quadro 36 – Evidência das RSC em meio a CD21.07

Categorias	N° de ordem	A obra apresenta...	Conteúdos
Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa	1	as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas	• Questão de introdução ao primeiro capítulo na qual questiona as relações entre ciência e sociedade; • Descreve os impactos dos lançamentos sob as cidades de Hiroshima e Nagasaki; • Questão acerca dos efeitos causados na sociedade pela aplicação do conhecimento científico;
	2	a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais	• Comparações entre as aplicações médicas do fenômeno da radioatividade e da produção de energia elétrica com o desenvolvimento de armas nucleares; • Questão acerca dos efeitos causados na sociedade pela aplicação do conhecimento científico;
	3	as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas	• Fala sobre o posicionamento de cientistas após o lançamento das bombas, centrado na figura de Einstein;
Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social	4	influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas	• Faz alusão à carta de Einstein-Szilard ao presidente dos EUA; • Aponta a influência do regime nazista para o posicionamento dos cientistas a favor de um programa nuclear; • Questão acerca das influências do contexto histórico na condução das pesquisas;
	5	a importância do conhecimento científico para atender as demandas sociais.	• Apresenta aplicações importantes para o contexto social: medicina e a produção de energia elétrica;

Fonte: autoria própria

4.3 Observações Gerais

Até o momento, foram apresentados resultados e discussões particulares a cada uma das obras pertencentes aos PNLDs de 2018 e 2021, evidenciadas nos quadros 6 e 7. Nas páginas seguintes, apresentarei uma síntese destes resultados, de modo a buscar convergências entre as coleções acerca do tema, afim de discutir possíveis maneiras de trabalhar os tópicos a partir desses materiais.

Para tanto, a apresentação destes resultados será dividida em termos das discussões sobre os saberes históricos e das possíveis evidencias de conteúdos relacionados às RSC.

4.3.1 O Projeto Manhattan nas coleções didáticas analisadas

Este tópico tem como objetivo responder a primeira questão norteadora, à saber: *"De quais maneiras o Projeto Manhattan é inserido nos manuais escolares de Física, destinados ao Ensino Médio, afim de evidenciar elementos vinculados à HFSC?".*

Inicialmente nota-se que todas as coleções, em algum momento, mencionam a existência de armamentos nucleares em meio ao livro do aluno, entretanto, algumas abordam os saberes históricos com maior profundidade que outras, de modo a apresentar uma maior quantidade de informações acerca do contexto histórico.

Afim de avaliar a exposição destes conteúdos, as coleções foram reunidas em 5 grupos, definidos pelos saberes que foram evidenciados e pelo grau de aprofundamento nas discussões. A seguir apresento uma descrição dos grupos e uma síntese destes resultados (Quadro 37).

O primeiro grupo refere-se a coleções que apenas mencionam a existência de armamentos nucleares, deste modo, não foram encontradas quaisquer discussões acerca de conteúdos históricos. Nestas coleções, os armamentos nucleares são apresentados apenas como um modo de exemplificar a aplicação tecnológica do conceito de fissão nuclear.

O segundo grupo contempla as coleções que mencionam os bombardeios às cidades de Hiroshima e Nagasaki. Destas coleções, cabe destacar a CD18.03 que utiliza o poema Rosa de Hiroshima para mencionar o ocorrido, e a CD18.11, que apresenta imagens das cidades e a quantidade de óbitos após as explosões. As demais coleções deste grupo apenas fazem alusão ao ocorrido, sem qualquer informação capaz de contextualizar o episódio.

O terceiro grupo abrange as coleções que, além de menções a explosão da bomba, apresentam outros elementos do contexto de produção do conhecimento, à saber: comenta a existência da carta de Einstein-Szilard (CD18.07), menciona a influência do contexto geopolítico para a efetivação das

pesquisas (CD18.10) e, cita a importância do Politetrafluoroetileno para o contexto histórico (CD21.06).

Portanto, as coleções pertencentes aos grupos 2 e 3 fazem referência ao contexto histórico das pesquisas, entretanto, utilizam destas informações de maneira dissociada das discussões conceituais, como modo de introduzir os conteúdos ou destacar curiosidades históricas relacionadas ao tema. Deste modo, ao utilizar estas coleções para discutir sobre elementos da HFSC acerca da aplicação dos saberes para a produção de armamentos nucleares, é necessário que sejam utilizadas fontes externas, capazes de contextualizar as discussões.

Já o quarto grupo reúne as coleções que apresentam propostas de atividades acerca do contexto histórico do PM. Dentre estas coleções, a CD21.05 apresenta apenas a proposta de pesquisa, enquanto as demais coleções apresentam também outros saberes históricos que contribuem para a discussão do tema, como: a destruição causada nas cidades afetadas pelas bombas (CDs 21.02 e 21.04); a construção do primeiro reator nuclear (CD18.05); o teste Trinity e o experimento de Fermi com pedaços de papel (CD18.06).

Realizar as atividades propostas pelas coleções deste grupo permite evidenciar elementos acerca da HFSC, entretanto, é importante destacar a importância do papel do professor como mediador, de modo a avaliar a presença de concepções equivocadas acerca do trabalho científico e de possíveis distorções históricas.

O grupo 5 compreende as coleções que abordam os saberes históricos de maneira ampla, de modo a apresentar discussões acerca de elementos da HFSC durante a exposição das discussões acerca do PM.

A CD18.01, ao expor a entrevista de José Leite Lopes, apresenta diversos elementos capazes de contextualizar as pesquisas realizadas para a produção da bomba atômica, além de evidenciar o posicionamento de parte da comunidade científica envolvida no projeto e os desdobramentos políticos e científicos no pós guerra.

Por sua vez, a CD18.04, ao introduzir a física nuclear, propõe uma reflexão sobre a natureza da ciência e a relevância do PM para o período histórico no qual ocorreu. A obra discute também a participação de cientistas

como Bohr, Einstein e Heisenberg para as pesquisas que envolviam a produção de armamentos nucleares nos países onde residiam.

Por fim, a CD21.07 apresenta um texto complementar acerca do processo de desenvolvimento da bomba atômica, no qual encontram-se diversas informações acerca das pesquisas e das consequências vinculadas ao processo de produção das bombas, de modo a pensar a dimensão ética do trabalho científico. O quadro a seguir apresenta uma síntese destes resultados, tendo em vista a exposição de conteúdos históricos.

Quadro 37 – Quadro síntese dos agrupamentos das coleções

	Descrição	Coleções
Grupo 1	Apenas menciona a existência de armamentos nucleares	CD 18.08; CD 21.01;
Grupo 2	Comenta sobre o lançamento das bombas às cidades de Hiroshima e Nagasaki	CD 18.02; CD 18.03; CD 18.09; CD 18.11; CD 18.12; CD 21.03;
Grupo 3	Apresenta outros saberes históricos, além das explosões	CD 18.07; CD 18.10; CD 21.06;
Grupo 4	Propõe atividades de pesquisa acerca do contexto histórico do PM	CD 18.05; CD 18.06; CD 21.02; CD 21.04; CD 21.05;
Grupo 5	Apresenta aspectos diversos acerca da Histórica do PM e suas consequências	CD 18.01; CD 18.04; CD 21.07

Fonte: autoria própria

Ainda, é importante destacar que apenas seis das coleções analisadas (cerca de um terço) mencionam o PM durante a exposição do conteúdo aos alunos, de modo que as CDs 18.01, 18.04, 18.06 e 21.07, apresentam discussões acerca do contexto histórico, enquanto as CDs 18.10 e 21.02 apenas mencionam o ocorrido. Por sua vez, as CDs 18.07 e 21.05 fazem referência ao PM apenas durante as orientações aos professores.

No que se refere aos conteúdos nos quais foram evidenciadas discussões relacionadas ao desenvolvimento de armamentos nucleares, notam-se citações em meio aos seguintes tópicos, pertencentes à área de FMC: Teoria da Relatividade, Mecânica Quântica e Física Nuclear.

Quadro 38 – Indicação dos tópicos de física em que foram evidenciadas menções ao tema de pesquisa

Coleção	Tópicos de física				
	Teoria da Relatividade	Mecânica Quântica	Física Nuclear		
	Equivalência massa-energia		Introdução "Física Nuclear"	Radioatividade	Reações nucleares
CD18.01	X			X	X
CD18.02			X		X
CD18.03				X	X
CD18.04		X	X		X
CD18.05	X	X	X		X
CD18.06			X		X
CD18.07				X	X
CD18.08	X				X
CD18.09				X	
CD18.10	X	X			
CD18.11					X
CD18.12	X				X
CD21.01				X	X
CD21.02				X	X
CD21.03					X
CD21.04			X		X
CD21.05			X	X	
CD21.06				X	X
CD21.07			X	X	

Fonte: autoria própria

No tratamento do tópico da teoria da relatividade, os armamentos nucleares são mencionados como modo de exemplificar a quantidade de energia associada à matéria, representada pela equação $E=m.c^2$, como foi observado nas coleções 18.01 e 18.08. Por outro lado, os comentários realizados pelas CDs 18.05 e 18.10 ocorreram por meio de quadros complementares, ao propor uma atividade de pesquisa acerca da carta assinada por Einstein e ao comentar a participação de Otto Frisch no PM, respectivamente.

As menções encontradas durante o tópico da “Mecânica Quântica” ocorreram ao trabalhar as contribuições de cientistas como Niels Bohr, Werner Heisenberg e Enrico Fermi. Deste modo, os saberes acerca do processo de desenvolvimento das armas nucleares não se fazem integrados aos conteúdos relacionados ao tópico, mas são apresentados como curiosidades acerca da importância de cientistas para o período.

Por sua vez, ao trabalhar a Física nuclear, podem ser notadas referencias em três momentos distintos: ao introduzir o tópico, ao tratar sobre o

fenômeno da Radioatividade e das radiações ionizantes e ao discutir as reações nucleares.

Para introduzir o tópico da física nuclear, os comentários são realizados afim de problematizar as aplicações do conhecimento científico, para tanto, utilizam do contexto histórico afim de demonstrar as implicações sociais das pesquisas realizadas, destacando a destruição das cidades de Hiroshima e Nagasaki.

Por sua vez, ao explicar as reações nucleares, os armamentos nucleares são largamente mencionados como modo de aplicação dos saberes, sendo as bombas atômicas aplicações do conceito de fissão nuclear e as bombas termonucleares, também chamadas de bombas de hidrogênio, aplicações da fusão nuclear. Entretanto, os saberes históricos se mostram escassos durante o tópico, tendo em vista que os comentários se voltam apenas à existência desta tecnologia.

Em meio ao tema da radioatividade, as coleções abordam as bombas como modo de contrapor os benefícios e malefícios provenientes das tecnologias que empregam o conceito, comparando com aplicações voltadas para a medicina, a indústria e a agricultura.

Outro aspecto importante de pensar são as metodologias utilizadas para trabalhar os saberes históricos durante as obras. Dentre as 19 coleções analisadas, nota-se a exposição dos saberes a partir de diferentes recursos, evidenciados no quadro a seguir.

Quadro 39 – Síntese dos recursos utilizados para abordar o desenvolvimento de armamentos nucleares

Coleções	Textos complementares	Questões	Imagens
CD18.01	X	X	X
CD18.02	X		X
CD18.03	X	X	
CD18.04	X	X	X
CD18.05	X		X
CD18.06	X		X
CD18.07	X	X	
CD18.08			
CD18.09			
CD18.10	X		
CD18.11		X	X
CD18.12	X		
CD21.01			
CD21.02	X	X	X

Coleções	Textos complementares	Questões	Imagens
CD21.03			
CD21.04	X		X
CD21.05		X	
CD21.06	X		X
CD21.07	X	X	X

Fonte: autoria própria

Por sua vez, são observados diferentes objetivos quanto aos textos complementares que abordam o tema, direcionados a: conteúdos históricos, discussões conceituais ou aplicações tecnológicas.

Quanto aos textos dedicados aos aspectos da HFSC, nota-se a entrevista de José Leite Lopes (CD18.01), a importância das experiencias históricas para o processo de tomada de decisão (CD18.02), a linha do tempo que representa a história da radioatividade (CD21.02), a importância do Politetrafluoroetileno para a fabricação da bomba (CD21.06) e, por fim, o desenvolvimento da bomba atômica (21.07). É importante destacar que apenas os textos das coleções 18.01, 21.06 e 21.07 dedicam-se exclusivamente ao contexto de desenvolvimento das armas nucleares, enquanto os demais apenas mencionam o contexto como parte dos conteúdos históricos trabalhados.

Ainda, notam-se textos que apresentam biografias de cientistas que de alguma forma contribuíram para o PM, são eles: Albert Einstein (CD18.04; CD18.07), ao assinar a carta enviada ao presidente estadunidense alertando os perigos das pesquisas nucleares; Niels Bohr (CD18.04; CD18.05), por fugir da ocupação da Dinamarca pela Alemanha nazista e aconselhar no projeto da bomba; Karl Heisenberg (CD18.04), por participar do projeto nuclear alemão; e Enrico Fermi (CD18.10), por participar do desenvolvimento do primeiro reator nuclear, parte fundamental para a fabricação da bomba de plutônio.

Por sua vez, os textos observados nas CDs 18.12 e 21.02, apresentam explicações conceituais sobre a reação de fissão nuclear. Nestes textos os armamentos nucleares são mencionados afim de demonstrar uma possível aplicação do conceito, de modo semelhantes a discussões evidenciadas em meio à explicitação dos conceitos.

Também foram observados textos com objetivo de apresentar aplicações tecnológicas dos saberes, nos quais as bombas atômicas são

comparadas com outros tipos de aplicações. Nota-se a presença de discussões dedicadas aos riscos tecnológicos e sociais destas aplicações (CDs 18.04, 18.06, 18.07, 21.04) de modo a observar os acidentes em usinas nucleares e a explosão de bombas com material radioativo.

Já as questões que mencionam o desenvolvimento de armamentos nucleares podem ser classificadas em dois grupos: aquelas que utilizam dos saberes históricos como curiosidade acerca dos conceitos e aquelas que questionam sobre o contexto histórico.

As questões pertencentes ao primeiro grupo apenas mencionam o ocorrido, como modo de contextualizar a pergunta a partir de fatos históricos, entretanto, o conhecimento acerca desses fatos não interfere no processo de resolução. Tais questões referem-se a temas como: as reações nucleares (CDs 18.01, 18.04, 18.07 e 18.11), a capacidade da radiação em penetrar na matéria (CD18.01) e as usinas nucleares (CD18.07).

O segundo grupo (CDs 18.03, 18.04, 18.07, 21.05, 21.07), por outro lado, compreende questões nas quais os alunos são indagados acerca dos acontecimentos que envolvem a produção e lançamento de armamentos nucleares, de modo que desconhecer o contexto histórico impossibilita responder a estas questões de maneira satisfatória.

Sobre as imagens que são utilizadas pelas coleções, nota-se a representação de: 1) explosões nucleares, a partir da ilustração do cogumelo de fumaça formada após as explosões sendo representadas as explosões de Nagasaki (CD18.01), Atol de Bikini (CD18.01; CD18.06), Atol de Eniwetok (CD18.04; CD18.05; CD21.04), o exercício nuclear em Mururoa (CD21.06) e explosões Indefinidas (CD18.02; CD18.05; CD21.07); 2) Artefatos nucleares, nas quais apresentam as bombas “*Fat Man*” (CD18.05; CD18.06) e “*Little boy*” (CD21.02), e também um míssil nuclear indefinido (CD18.01); e 3) representações da destruição causadas às cidades de Hiroshima e Nagasaki (CD18.01; CD18.11; CD21.04; CD21.07).

Além dos recursos, foram identificados dois momentos nos quais os temas são mencionados: durante a exposição dos conceitos, realizados no texto central que compõe as coleções; e ao longo do manual do professor, destinado a orientações sobre as estratégias recomendadas pelos autores das obras para trabalhar o conteúdo.

Quadro 40 – Momentos nos quais o desenvolvimento de armamentos nucleares é mencionado

Coleção	Explicitação dos conceitos	Manual do professor
CD18.01	X	
CD18.02	X	
CD18.03		
CD18.04	X	
CD18.05	X	X
CD18.06	X	X
CD18.07		X
CD18.08	X	X
CD18.09	X	
CD18.10	X	X
CD18.11	X	X
CD18.12		X
CD21.01	X	X
CD21.02	X	X
CD21.03	X	X
CD21.04	X	X
CD21.05	X	X
CD21.06	X	
CD21.07	X	X

Fonte: autoria própria

A explicitação dos conceitos refere-se a menções realizadas em meio ao texto central da obra, no qual são apresentadas as informações principais para a compreensão das discussões. Nota-se que se trata do método mais frequente ao abordar o tema.

Entretanto, cabe destacar que parte expressiva deste quantitativo se refere a obras que mencionam a existência de tecnologias bélicas ao discutir o tema das reações nucleares, como visto anteriormente. Deste modo, as elucidações realizadas durante a explicitação dos conceitos não são vistas como meio de integrar o tema a discussões conceituais, mas como possibilidade de exemplificar os conteúdos trabalhados.

Além dos conteúdos encontrados em meio aos livros dos estudantes, é importante destacar também os conteúdos evidenciados em meio aos manuais destinados aos professores, que possibilitam aprofundar as discussões sobre o tema ao disponibilizar novas informações e atividades relacionadas aos saberes históricos.

De início são observadas coleções que orientam para que as bombas atômicas sejam apresentadas ao introduzir a física nuclear, como modo de motivar os estudantes a partir de tópicos que sejam conhecidos por eles,

orientações nesse sentido são encontradas nas CDs: 18.05, 18.08, 18.11, 21.02, 21.03, 21.04, 21.05.

Há também obras que discutem a realização de atividades de pesquisa acerca dos saberes históricos. Dentre estas obras, as CDs 18.06 e 21.07 apresentam orientações acerca de atividades propostas ao longo do livro do aluno, destacando os elementos que consideram importantes de serem evidenciados pelos professores no processo de mediação da atividade.

Por outro lado, são observadas novas propostas de atividade, capazes de abordar uma grande quantidade de saberes históricos, são elas: a CD21.01, ao sugerir a realização de estratégias interativas em parceria com a área de Ciências Humanas e a produção de uma linha do tempo sobre a Radioatividade; a CD21.03, ao propor uma atividade do tipo Pense, Questione e Explore sobre temas relacionados à Física nuclear; a CD21.04, que propõe uma roda de conversa sobre o alto poder de destruição das bombas; e a CD21.05, que orienta a realização de uma atividade de pesquisa acerca dos armamentos nucleares.

Outras obras apresentam novos materiais escritos, que podem contribuir tanto para que o professor se informe acerca dos conceitos quanto para a leitura em sala, foram evidenciados os seguintes textos: na CD18.07, com um texto acerca da exploração da energia nuclear; na 18.10, uma biografia Einstein; na CD18.12, o texto “Explore em Biologia” que trabalha questões relacionadas à radioatividade e as radiações ionizantes; e, na CD21.02, o texto “A Radioatividade e a história do tempo presente” que retrata as consequências da utilização da energia nuclear a partir da história da ciência.

Portanto, é fundamental evidenciar a importância das orientações na abordagem da temática dos armamentos nucleares e do PM, tendo aumentado com o PNLD de 2018, tendo em vista que apenas a CD21.06 não orienta para explicitação destes saberes, em contrapartida do programa anterior, que foram evidenciadas orientações aos professores em pouco mais da metade das coleções que compõem o programa.

Por fim, nota-se que discussões acerca dos armamentos nucleares se fazem presentes em diversos temas da FMC, podendo ser trabalhados a partir de diferentes recursos didáticos. Entretanto, em grande parte das coleções, os conteúdos apresentados não compreendem uma abordagem satisfatória

acerca da HFSC, tendo demonstrado a necessidade de utilizar fontes externas às obras, afim de complementar os conteúdos disponibilizados.

4.3.2 As Responsabilidades Sociais dos Cientistas

Em relação à segunda questão, “Quais aspectos das Responsabilidades Sociais dos cientistas são possíveis identificar nos manuais que contemplam discussões acerca do Projeto Manhattan?”, os tópicos foram avaliados a partir de categorias de analises estabelecidas, tendo em vista os trabalhos que versam sobre o tema, evidenciados no capítulo 2.

Nas páginas seguintes, irei discutir como as coleções se apropriam destas categorias prévias de análise , afim de indicar possíveis estratégias para abordar o tema, a partir de convergências entre os resultados particulares apresentados na seção anterior. O quadro a seguir apresenta uma síntese destes resultados.

Quadro 41 – Distribuição das CDs quanto à contemplação das questões referentes às categorias prévias de análise sobre as RSC

Coleção	Categorias							
	Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa			Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social		Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos		
	Questão 1	Questão 2	Questão 3	Questão 4	Questão 5	Questão 6	Questão 7	Questão 8
CD18.01	X	X	X	X	X		X	
CD18.02		X			X			X
CD18.03	X	X			X			
CD18.04	X	X	X	X	X			
CD18.05		X		X	X			
CD18.06	X	X	X	X	X			
CD18.07	X	X		X	X			
CD18.08								
CD18.09		X						
CD18.10				X				
CD18.11	X			X				
CD18.12	X	X						
CD21.01	X	X			X			
CD21.02	X	X			X			
CD21.03	X	X	X		X			
CD21.04	X	X		X	X			
CD21.05	X				X			X
CD21.06		X	X	X	X			
CD21.07	X	X	X	X	X			

Fonte: autoria própria

4.3.2.1 Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa

A primeira categoria buscou compreender o modo como os livros apresentaram as implicações sociais das pesquisas desenvolvidas durante o PM, assim como as transformações políticas e econômicas produzidas pelo desenvolvimento e utilização dos armamentos nucleares.

Quanto a primeira questão, “a obra apresenta as consequências sociais do trabalho científico, para além das implicações tecnológicas?”, foram encontrados três modos de discutir tais implicações: a destruição das cidades de Hiroshima e Nagasaki, as consequências políticas da existência de armamentos nucleares e as consequências socioambientais das explosões.

A primeira delas se refere aos impactos causados pelas explosões nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, que como visto no tópico anterior, é mencionado por diversas obras, através de descrições do ocorrido e imagens das cidades após o bombardeio, evidenciando a quantidade de mortes, a devastação total da região e a contaminação radioativa nas cidades.

Além das descrições, nas CDs 18.03 e 18.06, é apresentado o poema “Rosa de Hiroshima”, de Vinicius de Morais, que faz referência a vítimas da bomba. Nota-se que uma reflexão acerca do conteúdo do poema permite discutir, além dos efeitos imediatos, os efeitos biológicos das radiações ionizantes, de modo a inserir recursos diversos na abordagem do tema.

Menções à destruição das cidades podem também ser encontradas em questões e atividades de pesquisa, nas CDs 18.04, 21.01 e 21.05, que orientam, como tópico de investigação, para que sejam avaliadas as condições nas quais as cidades se encontravam após as explosões.

Entendo que, ao trabalhar a utilização das bombas em cidades japonesas habitadas, é possível discutir as consequências imediatas e a dimensão com que uma aplicação científica voltada para a guerra pode atingir. Articular este evento a discussões acerca das RSC demonstra as relações entre a produção de novos saberes e a dimensão ética da prática científica.

Outro modo identificado para abordar esta primeira questão sobre as implicações sociais foi a elucidação de transformações políticas e econômicas decorrentes da existência de armamentos nucleares, citadas nas CDs 18.01,

18.11, 21.02, 21.07 e 21.04. Nestas coleções, são enfatizadas as movimentações políticas do pós guerra e o estabelecimento de novas relações de poder, dado a existência de países nuclearmente armados.

O tema é frequentemente trabalhado a partir de questionamentos, os quais visam problematizar os impactos sociais e políticos de possíveis guerras nucleares, tanto no decorrer dos conflitos quanto durante o pós guerra. Tais questionamentos são utilizados afim de introduzir o tema da física nuclear, evidenciando a importância histórica do PM para as pesquisas científicas.

Por fim, foi observado que a CD21.03 discute também os impactos ambientais causados pelas explosões nucleares, ao afirmar que os materiais radioativos produzidos na explosão seriam levados “pelo vento e pelas águas, disseminando a contaminação e com possíveis consequências em escala planetária” (LOPES E ROSSO, 2020, p. 86). Deste modo, a coleção demonstra a necessidade de pensar não apenas as consequências sociais e políticas, mas também as consequências socioambientais.

A segunda questão relacionada às implicações sociais: “a obra apresenta a natureza do saber científico em poder ser empregado tanto para a melhoria na qualidade de vida quanto para a produção de riscos sociais?”, buscou investigar o modo como as coleções abordam a produção de riscos sociais a partir de aplicações do conhecimento científico que, por vezes, são pensadas originalmente para suprir demandas sociais.

A única maneira encontrada para trabalhar o tópico foi a apresentação comparações entre benefícios e malefícios decorrentes das aplicações da energia nuclear. A discussão mais comum foi a comparação entre o modo como ocorre a fissão nuclear em reatores e armamentos nucleares, evidenciando que a diferença reside apenas no modo como estas reações são controladas.

Outro fator bastante mencionado pelas obras é a utilização de elementos radioativos e das radiações ionizantes em áreas como a medicina, de modo que, ao mesmo tempo que apresentam riscos à saúde dado os efeitos biológicos destas radiações, podem ser utilizadas em tecnologias voltadas à melhoria na qualidade de vida.

Cabe ainda destacar a presença de um diálogo sobre as aplicações dos saberes científicos, apresentado pela CD21.04, afim de introduzir discussões

sobre o modo como o conhecimento científico é aplicado na sociedade. O texto problematiza uma visão excessivamente crítica sobre a produção de tecnologias bélicas, evidenciando aspectos como a existência de vacinas e tratamentos de doenças, que foram possibilitados a partir do desenvolvimento científico e tecnológico.

Por sua vez, a terceira questão, “A obra apresenta as maneiras como os cientistas lidam com as consequências sociais de suas pesquisas?”, foi evidenciada a partir de textos complementares, biografias e propostas de atividades.

Quanto aos textos complementares, na CD18.01 é indicado os esforços da comunidade científica estadunidense para a criação da Comissão de Energia Atômica, dedicada ao controle civil das tecnologias nucleares, episódio fundamental sobre a participação dos cientistas frente a necessidade de frear o desenvolvimento bélico das tecnologias nucleares e a necessidade de dedicar recursos para a aplicação destes saberes em outras áreas da dimensão social.

Por sua vez, a CD21.07, durante o texto “Desenvolvimento da bomba atômica”, expõe o posicionamento de cientistas após o lançamento das bombas, contrários à continuação das pesquisas nucleares, centrado na figura de Albert Einstein.

Já na coleção 18.04, nota-se a importância das biografias para abordar o tema, de modo que são discutidos os posicionamentos de Bohr e Einstein sobre a construção de armamentos nucleares. Por sua vez, a CD21.06 recomenda a leitura do livro “Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos”, indicando que serão apresentados os dilemas morais que o pesquisador precisou lidar ao trabalhar no desenvolvimento da bomba atômica.

Em relação às atividades de pesquisa, é proposto a investigação acerca das ações e reações dos cientistas que participaram do PM antes e depois do lançamento das bombas (CD18.06), e sobre a atitude dos cientistas em se recusar a participar de programas de guerra (CD21.03).

Por fim, é importante observar que a primeira categoria foi evidenciada na maioria das obras analisadas, ausente apenas nas CDs 18.08 e 18.10, que trabalham a física nuclear de modo resumido. Assim, percebe-se que há, por parte dos autores, uma preocupação em discutir elementos relacionados às

implicações sociais dos cientistas, por vezes, evidenciando o modo como estes cientistas agiram frente as contradições de seu período histórico.

Observa-se também a importância das biografias e dos textos complementares, tanto para abordar as implicações sociais quanto as atitudes e posicionamentos dos cientistas. Neste sentido, afim de discutir aspectos voltados à HFSC e sobre as RSC, é importante que o professor faça uso destes textos, tendo em vista que estas discussões se mostram ausentes durante a explicitação dos conceitos.

4.3.2.2 Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social

Por sua vez, a segunda categoria buscou identificar a presença de fatores que influenciam as motivações dos cientistas e a definição dos problemas de pesquisa, afim de discutir a não neutralidade e a necessidade de pensar as demandas sociais durante a prática científica.

A quarta questão, “a obra apresenta influências de fatores econômicos e políticos no direcionamento das pesquisas?”, teve como objetivo identificar possíveis fatores que motivaram o estabelecimento do PM. Foram evidenciadas influências políticas e econômicas, e também discussões acerca de motivações pessoais dos cientistas.

Dentre os fatores políticos, destaca-se a ascensão do regime nazista, que por possuir um dos centros de pesquisa em física mais avançados da época, fez com que diversos pesquisadores se posicionassem a favor de um programa nuclear, afim de possibilitar criar oposição a uma possível bomba atômica alemã, tais discussões foram encontradas nas CDs 18.01, 18.05, 18.10 e 21.07.

Neste mesmo sentido, as CDs 18.05, 18.07, 18.10 e 21.07, fazem alusão à carta assinada por Einstein e Szilard, que alertava ao presidente dos EUA a possibilidade de um programa nuclear alemão. O documento, de alta relevância histórica, teve um grande impacto no direcionamento das pesquisas nucleares, sendo responsável pela instituição do Comitê do Urânio, grupo dedicado ao estudo da possibilidade de produção de armamentos nucleares em território norte americano.

Deste modo, a utilização da carta de Eintein-Szilard pode contribuir significativamente para discussões acerca da ética do trabalho científico e das relações entre ciência e sociedade, por se tratar de um documento histórico que pode ser apresentado e discutido, de modo a aproximar os alunos do contexto histórico e das principais preocupações da época.

Por sua vez, a CD18.01, ao indicar a disputa entre cientistas e militares pelo controle das pesquisas nucleares, demonstra as relações de forças acerca do controle das pesquisas, podendo evidenciar a influência de outros grupos, tais como os militares. Já a CD21.07 questiona como os alunos percebem “a influência do contexto histórico na condução das pesquisas científicas” (SANTOS ET AL., 2020, p. 29), questão capaz de suscitar diversas discussões acerca dos fatores que levaram ao desenvolvimento das bombas atômicas, a partir de conhecimentos históricos e filosóficos.

Quanto aos fatores econômicos, estes são indicados pelas CDs 18.01 e 18.11, tendo em vista a importância das agências de fomento para as pesquisas nucleares em diversos países e a alusão à necessidade de apoio financeiro para as pesquisas científicas.

Já as motivações pessoais podem ser abordadas a partir de uma atividade posposta pela CD18.06, ao solicitar que os alunos pesquisem sobre os indivíduos envolvidos no desenvolvimento das bombas, tanto de cientistas quanto líderes políticos, e as razões que declararam para o envolvimento na fabricação de armar nucleares.

Outras coleções também comentam acerca destes fatores, entretanto sem aprofundar no processo histórico do PM. Destaco a CD18.04, que menciona a influência de outras esferas, citando como exemplo as questões políticas, religiosas e econômicas, entretanto, sem aprofundar de que modo ocorre tais influências. Ainda, a CD21.06 demonstra a forma como o interesse político, e em seguida o interesse econômico, criaram condições para pesquisas sobre a aplicação do composto Politetrafluoroetileno, inicialmente na fabricação das bombas atômicas e posteriormente para equipamentos domésticos.

A questão de número 5, amplamente evidenciada nas coleções, “a obra apresenta a importância do conhecimento científico para atender as demandas

sociais?” buscou trechos capazes de evidenciar a relação entre as demandas sociais e o direcionamento das pesquisas.

Neste sentido, foram considerados pertinentes comentários sobre aplicações importantes para o contexto social, influenciando na melhoria da qualidade e na oferta de recursos básicos, como o desenvolvimento de novos tratamentos e diagnósticos, o aumento da produtividade de alimentos e na oferta de energia elétrica. No quadro abaixo apresento uma síntese de quais destas aplicações foram encontradas nas obras.

Quadro 42 – Aplicações tecnológicas evidenciadas nas coleções

Aplicações do saber	Coleções
Medicina nuclear	CD18.01; CD18.02; CD18.03; CD18.04; CD18.05; CD18.06; CD18.07; CD21.01; CD21.02; CD21.03; CD21.04; CD21.05; CD21.06; CD21.07;
Produção de energia elétrica	CD18.01; CD18.02; CD18.03; CD18.04; CD18.05; CD18.06; CD21.01; CD21.02; CD21.03; CD21.04; CD21.06; CD21.07
Agricultura	CD18.01; CD18.03; CD18.04; CD18.06; CD18.07; CD21.01; CD21.02; CD21.03; CD21.05; CD21.06;
Atividades científicas (Arqueologia e Geologia)	CD18.07; CD21.02; CD21.04; CD21.05; CD18.01; CD18.04;
Industria	CD18.02; CD18.03; CD18.07; CD21.02; CD21.05;

Fonte: autoria própria

Entretanto, para que as RSC sejam discutidas neste contexto, é fundamental evidenciar a importância de os cientistas e os órgãos de fomento terem como objetivo atender a estas demandas e carências sociais, de modo que a atividade científica, enquanto prática social, esteja voltada para a melhoria na qualidade de vida e ao desenvolvimento tecnológico e social.

4.3.2.3 Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos

A terceira categoria, vinculada à posição dos cientistas como especialistas e produtores de conhecimento, diz respeito ao modo como estes profissionais se comunicam com a sociedade, tanto com o público em geral, a partir do processo de educação científica, quanto com os responsáveis pelas políticas públicas, que guiam o trabalho científico e o modo como o conhecimento será aplicado.

Em relação à questão de número 6, “A obra apresenta as maneiras como os cientistas lidam com a divulgação de suas pesquisas?”, que tinha como objetivo discutir a atitude dos cientistas frente ao processo de divulgação de seus resultados, não foram evidenciados trechos capazes de suscitar discussões neste sentido.

Deste modo, faz-se necessário pensar maneiras de integrar estas discussões ao trabalhar a natureza do conhecimento, visto que a comunicação dos resultados, tanto para a comunidade acadêmica, a partir de publicações em periódicos, quanto para a sociedade em geral, a partir de atividades de divulgação, constitui uma parte importante das atribuições do cientista, visto a necessidade destas atividades para a formação de uma sociedade capaz de avaliar os riscos sociais inerentes à produção científica.

Para a questão de número 7, “A obra apresenta reflexões acerca da participação dos cientistas em espaços voltados à construção de políticas públicas?”, que buscava evidenciar a importância da participação política dos cientistas, apenas a CD18.01 apresentou trechos capazes de discutir o tema.

Na obra, é destacada a atuação do então vice-almirante e cientista brasileiro Alvaro Alberto para a formulação de uma política científica nacional, tendo em vista a importância destas políticas para os países que disputavam a fronteira do conhecimento acerca da energia nuclear. É destacado ainda que esta atuação culminou com a fundação do CNPq, de modo que:

> Foram concedidas bolsas de estudo para jovens brasileiros se especializarem em ciências, que fossem fazer pesquisas científicas e cursos de doutorado no exterior. O CNPq dava auxílio aos laboratórios científicos do país e às universidades que tivessem laboratórios. (BONJORNO, 2016, p. 261).

Portanto, o texto pode ser utilizado para demonstrar, a partir de um exemplo histórico, como a participação política dos cientistas é importante para a construção de políticas que visam auxiliar na produção acadêmica, para isso é fundamental destacar a relevância de agências como o CNPq para as pesquisas desenvolvidas nos dias atuais.

A questão de número 8, “A obra apresenta a importância de se tornar usual o diálogo entre os cientistas e a sociedade em geral?”, que buscava

evidenciar a importância da participação social no processo de tomada de decisões sobre o conhecimento científico, foi evidenciada em duas coleções.

Em um texto complementar, a CD18.02 discute a importância de o público se manter informado “para opinar e interferir nas decisões sobre o uso tecnológico do conhecimento científico”, para tanto, a coleção apresenta a necessidade de pensar não apenas os valores quantitativos, mas também elementos da dimensão social, “como os sentimentos das pessoas e os impactos sobre o equilíbrio ambiental” (BARRETO E XAVIER, 2016, p. 234).

Por sua vez, a CD21.05, a partir da proposta de uma atividade de pesquisa, objetivou discutir a importância da divulgação científica como meio de popularização da ciência. Para isso, solicitou que os alunos produzissem um material de divulgação científica acerca de temas relacionados à física nuclear, a ser apresentado para o público não especialista.

Nota-se que a atividade coloca os alunos na posição de comunicadores do saber, para que percebam a importância da divulgação para a construção de uma sociedade mais conectada à comunidade científica, possibilitando a desmistificação de “crenças populares que não correspondem aos conhecimentos científicos aceitos atualmente” (FUKUI ET AL., 2020, p. 203).

Ambas as coleções argumentam para a necessidade de manter-se informado acerca dos conhecimentos científicos, porém, não é evidenciada a posição do cientista neste processo, de modo que, para que esta responsabilidade seja abordada, é importante que os textos sejam trabalhos de modo a destacar tanto a necessidade de o público compreender as inovações tecnológicas, quanto a necessidade de os pesquisadores se mostrarem atuantes no processo de educação científica.

Por fim, destaco que a terceira categoria foi a menos trabalhada pelas obras, encontrada em apenas três das dezenove coleções analisadas. Este fato demonstra que não há, por parte das obras, a intenção de abordar o modo como os cientistas atuam para a divulgação do conhecimento científico a partir do episódio do PM.

Entretanto, destaco a relevância do episódio para o tema, tendo em vista as declarações de cientistas relacionados ao contexto que, mesmo contrários à concepção de responsabilidades acerca das consequências sociais do trabalho científico, já alertavam para a responsabilidade de comunicar seus resultados e

promover a educação científica do público em geral, tais como Teller (1947), Oppenheimer (1948) e Bridgman (1948), de modo que a comunidade não especializada estaria mais capacitada a compreender as dimensões das inovações tecnológicas e tomar decisões acerca de suas aplicações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De início, é importante destacar a relevância de elementos dedicadas ao ensino de ciências a partir de conteúdos relacionados à HFSC, que têm demonstrado resultados significativos para o aumento do interesse por temas científicos entre os estudantes, e também, para a aprendizagem de elementos pertencentes à natureza do trabalho científico, fundamental para o processo de popularização e desmistificação da ciência.

Entretanto, como discutido na introdução, existem ainda diversos obstáculos que impedem a inserção destes conteúdos de modo eficaz nos sistemas de ensino, assim como uma dificuldade em articular os conceitos científicos e saberes históricos às demais dimensões do trabalho científico, como as questões políticas, econômicas e éticas que permeiam tal prática.

Uma das práticas potencialmente significativas para trabalhar os conteúdos históricos no ensino de ciências, que tem sido discutida na literatura, é a utilização de episódios históricos, de modo a trabalhar a história da ciência como um processo complexo, resultado de um contexto histórico no qual as pesquisas estão inseridas.

Neste trabalho, selecionamos o episódio conhecido como “Projeto Manhattan”, tendo em vista sua importância, tanto para a ciência quanto para a sociedade como um todo. No primeiro capítulo, foram apresentados os resultados de um trabalho historiográfico sobre episódio, o qual demonstrou grande relevância do contexto histórico para a área de ensino de ciências.

Percebemos que o episódio contribuiu para o desenvolvimento das diversas áreas da pesquisa científica (física, química, biologia), tendo em vista que os trabalhos buscavam não se limitaram a fabricação de armamentos nucleares, e sim a compreensão de todo o processo físico e químico que possibilitaria seu desenvolvimento, assim como os efeitos biológicos destes artefatos.

No que se refere à física, campo de interesse deste trabalho, o PM contribuiu para um avanço significativo nos conhecimentos acerca da constituição da matéria, a partir de estudos que buscavam compreender os fenômenos nucleares e as aplicações tecnológicas destes saberes.

Para além das implicações científicas, percebemos também que o PM demonstra, a partir da produção de armas de destruição em massa, as relações entre ciência, tecnologia e sociedade, de modo que as dimensões políticas e econômicas do trabalho científico se evidenciam através das consequências sociais da segunda metade do século XX, com o estabelecimento de novos centros de poder, impactando na dinâmica de relação entre os povos.

Estas transformações sociais motivaram novos debates, voltados à natureza do trabalho científico e às responsabilidades associadas a esta prática, apresentados durante o segundo capítulo. Tais discussões resultaram na caracterização das responsabilidades sociais dos cientistas, vinculadas às implicações sociais do trabalho científico e apoiada em uma compreensão de ciência como prática social, que influencia e é influenciada pela sociedade. Estas responsabilidades podem ser compreendidas nos seguintes termos: 1) Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa; 2) Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social; e 3) Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos.

Tendo em vista a relevância do PM e a importância de ensinar sobre a natureza da ciência, investigamos os modos como os conteúdos históricos, relacionados ao episódio, apresentados em materiais escolares de ciências/física, permitem discussões sobre a dimensão ética da pesquisa, em especial, às responsabilidades sociais cientistas.

Em relação à primeira questão que buscamos responder, sobre a inserção de discussões acerca do PM nas obras, observamos que todas as coleções, de alguma forma, mencionam a existência de armamentos nucleares, entretanto, notamos que esta abordagem foi realizada em cinco níveis distintos de aprofundamento.

No primeiro, as obras apenas mencionaram a existência de armamentos nucleares, de modo que não são apresentados quaisquer saberes históricos acerca do ocorrido. Tal abordagem, encontrada em duas coleções, impossibilita trabalhar elementos voltados à HFSC a partir do tema.

No segundo nível, as coleções comentaram sobre o lançamento das bombas às cidades de Hiroshima e Nagasaki, entretanto, não foram encontradas informações sobre as pesquisas dedicadas ao desenvolvimento

das bombas. Neste grupo, composto por seis coleções, as discussões históricas limitam-se a elucidação do fato.

Já no terceiro nível, as coleções mencionam, além da destruição das cidades, outros fatores históricos que contribuíram para o desenvolvimento das bombas, entretanto, estes fatores são abordados como curiosidades acerca do saber científico, sem discutir as demais dimensões do saber. Foram identificadas três coleções neste grupo.

No quarto nível, as coleções realizaram propostas de atividades relacionadas à HFSC, solicitando que os alunos investigassem o contexto histórico das pesquisas, afim de apresentar seus resultados aos demais alunos. Esta abordagem, evidenciada em cinco coleções, permite que o aluno perceba elementos diversos sobre os acontecimentos históricos, entretanto, é necessário prensar a importância do processo de mediação da atividade por parte dos professores.

Por fim, no quinto nível, as coleções abordaram os saberes históricos de maneira ampla, apresentando discussões capazes de elucidar as questões éticas e políticas do período. Portanto, esta abordagem, encontrada em três coleções, permite discutir diversos aspectos do contexto histórico, de modo a refletir sobre a natureza da ciência a partir dos conceitos físicos trabalhados.

No que se refere a apresentação do PM, cabe ainda destacar os conteúdos nos quais as discussões foram encontradas e os recursos utilizados para trabalhar o tema.

Quanto aos conteúdos, percebemos que o principal tópico a evidenciar o tema foi a Física Nuclear, através de conceitos como a Radioatividade, as radiações ionizantes e as Reações nucleares. Entretanto, também foram evidenciados durante a explicação da Teoria da Relatividade (equivalência massa-energia) e da Mecânica Quântica (elementos biográficos de pesquisadores). Portanto, entendemos que é possível utilizar o episódio para trabalhar elementos de diversos tópicos da FMC

Quanto aos recursos utilizados, foi observado a utilização de textos complementares, questões e imagens, além de menções realizadas durante as explicações dos conceitos. É fundamental destacar a importância dos manuais destinados aos professores, de modo que em algumas coleções, os tópicos são mencionados apenas durante as orientações, ressaltando novamente a

importância da intencionalidade didática do docente para que os conteúdos sejam trabalhados.

Portanto, percebemos que, apesar de ser mencionado pelas coleções, o PM não é trabalhado de modo aprofundado pela maioria das obras, apresentado como curiosidade complementar aos conceitos estudados.

No que se refere à segunda questão, sobre quais aspectos das RSC podem ser evidenciados, foram observados elementos distintos vinculados a cada uma das categorias de análise.

Quanto a primeira categoria, a *"Responsabilidade de refletir acerca das consequências da pesquisa*", notamos possibilidades de trabalhar as implicações sociais a partir da exposição dos lançamentos das bombas às cidades de Hiroshima e Nagasaki e da elucidação das consequências geopolíticas e ambientais, originadas na corrida pelo desenvolvimento de armas nucleares.

Ainda, as comparações entre as tecnologias bélicas com aquelas pensadas para a melhoria da qualidade de vida, como as aplicações voltadas para a área da saúde, podem contribuir para pensar o modo como o conhecimento científico é apropriado, visto que ao mesmo tempo que contribui para o desenvolvimento tecnológico, também produz riscos sociais.

Outro fator importante, encontrado em algumas coleções, é a atitude dos cientistas frente às consequências de seu trabalho. Percebemos que este tema foi evidenciado em biografias, textos complementares e atividades de pesquisa.

Por sua vez, a segunda categoria, a *"Responsabilidade de buscar produzir ciência com relevância social",* foi observada em termos das influências de fatores políticos e econômicos para o direcionamento das pesquisas, percebidos pelas motivações apresentadas pelos cientistas para integrarem o projeto.

Neste sentido, percebemos diversas menções à carta de Einstein-Szilard, vinculada à ascensão do nazismo na Alemanha, como modo de expor os pensamentos destes pesquisadores, agindo com intuito de pressionar o governo estadunidense para reagir à ameaça alemã através do estabelecimento de um programa nuclear. Percebemos também a importância do pós guerra para debater o tema, destacando a não neutralidade da ciência.

Quanto à responsabilidade de atender as demandas sociais, foram observadas diversas menções a aplicações tecnológicas do saber, em áreas como: medicina, agricultura, produção de energia elétrica, indústria e atividades científicas. Por meio destas aplicações, é possível trabalhar o caráter transformador do conhecimento científico, afim de evidenciar a importância de se pensar as demandas sociais para a definição dos objetivos a serem alcançados.

Em relação à terceira categoria, a *"Responsabilidade de comunicar e aconselhar o público e os governos"*, notamos que esta foi a menos trabalhada nas obras, sendo evidenciada em apenas três das dezenove coleções.

Entretanto, notamos a possibilidade de demonstrar a importância da participação política dos cientistas a partir do exemplo do vice-almirante e cientista brasileiro Alvaro Alberto, que resultou na fundação do CNPq, um dos principais órgãos de financiamento à pesquisa em território nacional. Ainda, a importância da comunicação entre os cientistas e a população foi percebida em apenas duas coleções, ao problematizar o processo de tomada de decisão.

Portanto, percebemos diversas formas de trabalhar as RSC a partir das apresentações sobre o "Projeto Manhattan" em manuais escolares dirigidos ao ensino de Física, tais quais: as implicações sociais da pesquisa, a partir da elucidação das consequências do trabalho científico; a capacidade cientifica de atender as demandas sociais e, ao mesmo tempo, produzir riscos sociais; a problematização das atitudes dos cientistas em relação ao conhecimento produzido; as influências políticas e econômicas sob a ciência; e a necessidade por pesquisas que visam o bem estar social.

Entretanto é importante destacar que tais discussões centraram-se nas implicações sociais do trabalho cientifico, trabalhando de modo superficial as demais responsabilidades.

Alertamos que, para que seja possível discutir tais responsabilidades a partir dos manuais escolares analisados, é necessário que haja, por parte dos professores, atenção aos elementos éticos e políticos da prática científica, tendo em vista que, em grande parte dos casos, tais conteúdos não se fazem explícitos nas obras.

Deste modo, nossa pesquisa tem como implicação para a área um novo olhar para as questões éticas do saber, em específico para as

responsabilidades vinculadas ao trabalho do cientista, direcionadas ao ensino de física e à compreensão destes elementos no que se refere à natureza da ciência.

Com esta pesquisa, demonstramos possibilidades para a inserção de discussões sobre as responsabilidades sociais dos cientistas a partir dos manuais escolares aprovados pelas ultimas duas edições do PNLD. Esperamos que tais resultados sirvam de suporte para que professores possam refletir acerca da inserção de tais conteúdos, e que possam ser utilizados como pontos de partida para uma modificação da prática em sala de aula.

Por fim, reconhecemos como proposta de continuidade, a produção de materiais e sequências didáticas dedicadas ao tema, assim como a avaliação da implementação destes materiais, afim de compreender de que modo tais discussões podem contribuir, em sala de aula, para a aprendizagem dos conceitos físicos e de elementos acerca da natureza do trabalho científico.

Referências

ADORNES, A. G. R. et al. Uma proposta para o ensino de física nuclear na formação de professores de física e química. **Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 14, n. 26, p. 363–374, 2018.

AMABIS, J. M. et al. **Moderna Plus: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: Moderna, 2020

ANDERSON, H. L.; FERMI, E.; SZILARD, L. Neutron production and absorption in uranium. **Physical Review**, v. 56, n. 3, p. 284–286, 1939.

ARQUIVO NACIONAL DO BRASIL. **Dicionário Brasileiro de Terminologia Arquivística**. Rio de Janeiro: Arquivo Nacional, 2005.

ATOMIC HERITAGE FOUNDATION. **Trinity Test -1945**. 2014.

BARRETO FILHO, B.; DA SILVA, C. X. **Física aula por aula**. 3. ed. São Paulo: FTD, 2016.

BASTOS, A. V. B. Neutralidade x Responsabilidade social na pesquisa. **Revista de Administração**, v. 23, n. 1, p. 248–253, 1988.

BERG, P. Asilomar 1975: DNA modification secured. **Nature**, v. 455, n. 7211, p. 290–291, 2008.

BERG, P. et al. Asilomar Conference on Recombinant DNA Molecules. **Science**, , v. 188, n. 4192, p. 991–994, 1975.

BIEZUNSKI, M. **História da Física Moderna**. 1 ed., Instituto Piaget, 1998.

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **Física**. 3. ed. São Paulo: Editora Ática, 2016.

BOHR, N. I. On the constitution of atoms and molecules. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 26, n. 151, p. 1–25, 1913.

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

BRASIL. **DECRETO-LEI Nº 93, DE 21 DE DEZEMBRO DE 1937**. Cria o Instituto Nacional do Livro. Brasilia, DF: Diário Oficial da União, 1937.

_____. **DECRETO No 1.246, DE 16 DE SETEMBRO DE 1994.** Promulga o Tratado para a Proscrição das Armas Nucleares na América Latina e no Caribe. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1994.

_____. **DECRETO No 2.864, DE 7 DE DEZEMBRO DE 1998.** Promulga o Tratado sobre a Não-Proliferação de Armas Nucleares. Brasília, DF: Diário

Oficial da União, 1998a.
_____. **DECRETO LEGISLATIVO Nº 64, DE 1998**. Aprova o texto(*) do Tratado de Proibição Completa de Testes Nucleares - CTBT. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1998b.
BRASIL. Senado Federal. Secretaria-Geral da Mesa Secretaria de Comissões. Ofício N° 34/2020/SCOM. **Ideia Legislativa N° 144131**. Brasília, DF, 2020a.
_____. Ofício N° 001/2021/ SCOM**. Ideia Legislativa N° 143379**. Brasília, DF, 2020b.
BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular: Educação é a base**. Brasília: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica, 2017a.
_____. **PNLD 2018: física – guia de livros didáticos – ensino médio.** Brasília: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica, 2017b.
_____. **Guia Digital PNLD 2021 Projetos Integradores e Projeto de Vida: Apresentação**. Brasilia: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica, 2021.
BRASIL. Ministério da Educação. Fundo nacional de desenvolvimento da educação. **EDITAL DE CONVOCAÇÃO Nº 03/2019 – CGPLI**. Brasília, DF: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica, 2019.
BRIDGMAN, P. W. Scientists and Social Responsibility. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 4, n. 3, p. 69–72, 1948.
BRONOWSKI, J. The Real Responsibilities of the Scientist. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 12, n. 1, p. 10–13, 1956.
BROUWER, W. Taking Responsibility for the Implications of Science. **Bulletin of Science, Technology & Society**, v. 14, n. 4, p. 192–202, 1994.
BRUNNER, R. D; ASCHER, W. Science and social responsibility. **Policy Sciences**, v. 25, n. 3, p. 295–331, 1992.
Bulletin. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 1, n. 1, p. 1–1, 1945.
CANDEIAS, J. A. N. Responsabilidades Sociais e éticas do cientista. **Revista de Saúde Pública**, v. 33, n. 2, p. 111–112, 1999.
CARVALHO, J. F. A gênese da bomba. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 197–208, 2015.
CHADWICK, J. The existence of a neutron. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical**

Character, v. 136, n. 830, p. 692–708, 1932.
CURIE, I; JOLIOT, F. Émission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons y très pénétrant. **Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences**, v. 194, p. 273–275, 1932.
DAS NEVES, D. R. M. et al. Debates, contextos e lacunas no desenvolvimento coletivo da teoria sobre raios catódicos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 3, p. 1619–1649, 2021.
DIAS, V. S. **HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA NA PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIAS NO BRASIL: MANUTENÇÃO DE UM MITO?.** 2008. 115 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, São Paulo, 2008.
DINIS, A. Responsabilidade Moral Dos Cientistas. **Revista Portuguesa de Filosofia**, v. 50, n. 1, p. 123–131, 1994.
DOUGLAS, H. E. The moral responsibilities of scientists: (Tensions between autonomy and responsibility). **American Philosophical Quarterly**, v. 40, n. 1, p. 59–68, 2003.
EINSTEIN, A. [Carta] 2 ago. 1939, Peconic [para] Roosevel, F. D., Washington. **Einstein-Szilard Letter**. Disponível em: <https://ahf.nuclearmuseum.org/ahf/key-documents/einstein-szilard-letter/>.
EINSTEIN, Albert. On the Moral Obligation of the Scientist. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 8, n. 2, p. 34–35, 1952.
EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **FÍSICA Quântica: Atomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 1. ed., São Paulo: Editora Campus, 1995.
EVERS, K. **Standards for Ethics and Responsibility in Science: An analysis and evaluation of their content, background and function**. In: The International Council for Science, 2001.
FELICIO, J. E. M; FUJITA, E. O. S.; NETO, A. E. Z. O TRATADO DE NÃO-PROLIFERAÇÃO NUCLEAR (TNP). **Revista Parcerias Estratégicas**, v. 1, n. 1, p. 19–26, 1996.
FERMI, E. et al. Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 146, n. 857, p. 483–500, 1934.

FERMI, E. Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92. **Nature**, v. 133, n. 3372, p. 898–899, 1934.
FERMI, L. **Atoms in the family: my life with Enrico Fermi**. 1 ed., Chicago: The University of Chicago Press, 1954.
FILGUEIRAS, C. A. L. A espectroscopia e a química: da descoberta de novos elementos ao limiar da teoria quântica. **Química Nova na Escola**, v. 3, p. 22–25, 1996.
Sociedade Brasileira de Física. **Alerta da Comissão de Área de Física Nuclear para a consulta pública sobre construção de bomba atômica brasileira**. 2020. Disponível em: <https://sbfisica.org.br/v1/sbf/alerta-da-comissao-de-area-de-fisica-nuclear-para-a-consulta-publica-sobre-construcao-de-bomba-atomica-brasileira/>.
FLICK, Uwe. **Uma introducao à pesquisa qualitativa**. 2 ed ed., Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2004.
FORATO, T. C. M; PIETROCOLA, M; MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 27–59, 2011.
Atomic Heritage Foundation. **Trinity Test -1945**. 2014. Disponível em: <https://ahf.nuclearmuseum.org/ahf/history/trinity-test-1945/>.
FRANCK, J. The Social Task of the Scientist. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 3, n. 3, p. 70–70, 1947.
FRISCH, O. R.; PEIERLS, R. The Frisch-Peierls Memorandum. *In*: **BRITISH SCIENTISTS AND THE MANHATTAN PROJECT**. 1 ed. MACMILLAN, 1940.
FUKUI, A. et al. **Ser Protagonista: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: SM, 2020
FURTADO, C. Responsabilidade social dos cientistas. **Ciência e Cultura**, v. 5, n. 10, p. 1100–1002, 1979.
GASPAR, A. **Compreendendo a Física.** 3. ed. São Paulo: Ática, 2016.
GEIGER, H. The scattering of α-particles by matter. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 83, n. 565, p. 492–504, 1910.
GEIGER, H; MARSDEN, E. On a diffuse reflection of the α-particles. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 82, n. 557, p. 495–500, 1909.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6 ed., São Paulo: Atlas, 2008.
GILMER, P. J. Irène Joliot-Curie: A Nobel Laureate in Artificial Radioactivity. *In*: **Celebrating the 100th Anniversary of Madame Marie Sklodowska Curie's Nobel Prize in Chemistry**. 1 ed. Rotterdam: Sense Publishers, 2011.
GLERUP, C; HORST, M. Mapping 'social responsibility' in science. **Journal of Responsible Innovation**, v. 1, n. 1, p. 31–50, 2014.
GODOY, A. S. Pesquisa Qualitativa: Tipos Fundamentais. **Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 3, p. 20–29, 1995a.
GODOY, A. S. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 2, p. 57–63, 1995b.
GODOY, L.; DELL'AGNOLO, R. M.; MELO, W. C. **Multiversos: Ciências da Natureza**. São Paulo: FTD, 2020.
GOMBRADE, R; LONDERO, L. Percepções de estudantes sobre usinas nucleares e o resíduo radioativo. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 17, n. 2, p. 286–299, 2022.
GONÇALVEZ FILHO, A.; TOSCANO, C. **Física: interação e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Leya, 2016.
GUIMARÃES, O.; PIQUEIRA, J. R.; CARRON, W. **Física**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
HANSEN, T. B. Academic and social responsibility of scientists. **Journal on Science and World Affairs**, v. 2, n. 2, p. 71–92, 2006.
HART, H. L. A. **Punishment and Responsibility: Essays in the Philosophy of Law**. 2. ed., New York: Oxford University Press, 2008.
HERRLICH, P. The responsibility of the scientist. **EMBO Reports**, v. 14, n. 9, p. 759–764, 2013.
HILL, A. V. The Moral Responsiblities of Scientists. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 1, n. 7, p. 3–3, 1946.
HÖTTECKE, D; SILVA, C. C. Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge: An Analysis of Obstacles. **Science & Education**, v. 20, n. 3–4, p. 293–316, 2011.
JAUNCEY, G. E. M. The Early Years of Radioactivity. **American Journal of Physics**, v. 14, n. 4, p. 226–241, 1946.
JOLIOT, F.; CURIE, I. Artificial Production of a New Kind of Radio-Element.

Nature, v. 133, n. 3354, p. 201–202, 1934.
KENNEDY, J. W. et al. Properties of 94(239). **Physical Review**, v. 70, n. 7–8, p. 555–556, 1946.
KOBYLAREK, A. Social responsibility of science. **Journal of Education Culture and Society**, v. 10, n. 2, p. 5–11, 2019.
KRIPKA, R. M. L; SCHELLER, M; BONOTTO, D. L. Pesquisa documental na pesquisa qualitativa : conceitos e caracterização. **Revista de Investigaciones UNAD**, v. 14, n. 2, p. 55–73, 2015.
LAURENCE, W. L. **Dawn over zero: the story of the atomic bomb**. Londres: Museum, 1947.
LOPES, C. V. M. **Modelos atômicos no início do século XX : da física clássica à introdução da teoria quântica**. 2009. 173 f. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2009.
LOPES, S.; ROSSO, S. **Ciências da Natureza**. São Paulo: Moderna, 2020.
LUDWIG, A. C. W. A pesquisa em educação. **Revista Linhas**, v. 4, n. 2, p. 1-19, 2003.
LUZ, A. M. R.; ALVARENGA, B. A.; GUIMARÃES, C. C. **Física: contexto e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2016.
MACDOWELL, S. Responsabilidade social dos cientistas: natureza das ciências exatas. **Estudos Avançados**, v. 2, n. 3, p. 67–76, 1988.
MARCUSE, H. A responsabilidade da ciência. **Scientiae Studia**, v. 7, n. 1, p. 159–164, 2009.
MARTINI, G. et al. **Conexões com a física**. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2016.
MARTINS, R. A. **Becquerel e a Descoberta da Radioatividade: uma Análise Crítica**. 1 ed., Livraria da Física, 2012.
_____. Seria possível uma história da ciência totalmente neutra, sem qualquer aspecto whig?. **Boletim de História e Filosofia da Biologia**, v. 4, n. 3, 2010.
MEIER, R. L. What Should the Atomic Scientists do Now?. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 4, n. 3, p. 81–82, 1948.
MEITNER, L; FRISCH, O. R. Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. **Nature**, v. 143, n. 3615, p. 239–240, 1939.
MELZER, E. E. M; AIRES, J. A. A história do desenvolvimento da teoria atômica: um percurso de Dalton a Bohr. **Amazônia: Revista de Educação em**

Ciências e Matemáticas, v. 11, n. 22, p. 62, 2015.
MITCHAM, C. Responsibility and Technology: The Expanding Relationship. *In*: **TECHNOLOGY AND RESPONSIBILITY**. Dordrecht: SPRINGER-SCIENCE BUSINESS MEDIA, 1987. p. 3–40.
MORTIMER, E. et al. **Matéria, Energia e Vida: Uma Abordagem Interdisciplinar**. São Paulo: Scipione, 2020.
MOSZKOWSKI, A. **Conversations with Einstein**. New York: Horizon Press, 1970.
MOURÃO, R. R. F. Hiroshima e Nagazaki: razões para experimentar a nova arma. **Scientiae Studia**, v. 3, n. 4, p. 683–710, 2005.
NAGAOKA, H. L. V. Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 7, n. 41, p. 445–455, 1904.
NAKAGAWA, C. I. Hiroshima: A catástrofe atômica e suas testemunhas. **Estudos Avancados**, v. 29, n. 84, p. 241–259, 2015.
NESVIZHEVSKY, V; VILLAIN, J. The discovery of the neutron and its consequences (1930–1940). **Comptes Rendus Physique**, v. 18, n. 9–10, p. 592–600, 2017.
NICHOLSON, J. W. LXXXIV: A structural theory of the chemical elements. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 22, n. 132, p. 864–889, 1911.
_____. Constitution of the solar corona II. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 72, p. 677–692, 1912.
NODDACK, I. Über das Element 93. **Angewandte Chemie**, v. 47, n. 37, p. 653–655, 1934.
NORRIS, R. S. **Racing for the Bomb: General Leslie R. Groves, the Manhattan Project's Indispensable Man**. 1 ed., Royalton: Steerforth Press, 2002.
O'HARA, F. R. S; George Johnstone Stoney and the concept of the electron. **Notes and Records of the Royal Society of London**, v. 29, n. 2, p. 265–276, 1975.
OKUNO, E. As bombas atômicas podem dizimar a humanidade - Hiroshima e Nagasaki, há 70 anos. **Estudos Avancados**, v. 29, n. 84, p. 209-218, 2015.

OPPENHEIMER, J. R. **Recommendations on the immediate use of nuclear weapons**. Science Panel's Report to the Interim Committee. 1945.

_____. Physics in the Contemporary World. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 4, n. 3, p. 65–86, 1948.

PATTI, C. O programa nuclear brasileiro entre passado e futuro. **Boletim Meridiano 47**, v. 14, n. 140, p. 49–55, 2013.

PIETROCOLA, M. et al. **Física em Contextos**. 1. ed. São Paulo: Editora do Brasil, 2016.

PIROLO, M. **A contribuição de Robert Wilhelm Bunsen e Gustav Robert Kirchhoff para a espectroscopia do século XIX**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2010.

POPPER, K. R. The Moral Responsibility of the Scientist. **Bulletin of Peace Proposals**, v. 2, n. 3, p. 279–283, 1971.

Potsdam Declaration. Proclamation Defining Terms for Japanese Surrender Issued, Potsdam, 1945.

NOBEL PRIZE. **Joseph Rotblat Facts**. 2022. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/peace/1995/rotblat/facts/>.

RANGEL, M. Qualidade do livro didático: dos critérios da literatura acadêmica aos do Programa Nacional do Livro Didático. **Linhas Críticas**, v. 11, n. 21, p. 187–200, 2005.

RAVETZ, J. **Scientific Knowledge and Its Social Problems**. New York: Oxford University Press, 1971.

REIS, D. M. **Ensino de física e os três momentos pedagógicos: a física nuclear na educação de jovens e adultos**. 2021. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2021.

REZENDE, L. P; ÁVILA, R. A inovação e o fenômeno bélico. **Austral: Brazilian Journal of Strategy and International Relations**, v. 3, n. 6, p. 225–248, 2014. ISSN: 22386912. DOI: 10.22456/2238-6912.47744

RHODES, R. **The making of the atomic bomb**. 1 ed., New York: Simon & Schuster, 1986.

ROBOTTI, N; PASTORINO, F. Zeeman’s discovery and the mass of the electron. **Annals of Science**, v. 55, n. 2, p. 161–183, 1998.

RODRIGUES JUNIOR, E. et al. Implicações didáticas de história da ciência no

ensino de Física: uma revisão de literatura através da análise textual discursiva. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 769, 2015.
ROOS, M; HOFFART, F. M. Climate Change and Responsibility. *In*: **Climate Economics: A Call for More Pluralism And Responsibility**. Palgrave Macmillan Cham, p. 121–155, 2021.
ROSA, M. D. o Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) e os livros didáticos de ciência. **Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino**, v. 1, n. 2, p. 132–149, 2017.
ROTBLAT, J. Leaving the bomb project. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 41, n. 7, p. 16–19, 1985.
RUSSELL, B. The social responsibilities of scientists. **Science**, v. 131, n. 3398, p. 391–392, 1960.
RUTHERFORD, E. Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. **Philosophical Magazine Series**, v. 47, n. 284, p. 109–163, 1899.
_____. XV. The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 5, n. 26, p. 177–187, 1903.
_____. XIX. Retardation of the α particle from radium in passing through matter . **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 12, n. 68, p. 134–146, 1906.
_____. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom . **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 21, n. 125, p. 669–688, 1911.
_____. Collision of α particles with light atoms. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 37, n. 222, p. 537–587, 1919.
_____. Nuclear Constitution of Atoms. **Nature**, v. 105, n. 2642, p. 500–501, 1920.
RUTHERFORD, E; CHADWICK, J. The Disintegration of Elements by α-Particles. **Nature**, v. 107, n. 2680, p. 41–41, 1921.
RUTHERFORD, E; SODDY, F. XLI. The cause and nature of radioactivity .—Part I . **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 4, n. 21, p. 370–396, 1902.
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, 2010, **Anais** [...].

SÁ-SILVA, J. R; ALMEIDA, C. D; GUINDANI, J. F. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. **Revista Brasileira De História &Amp; Ciências Sociais**, v. 1, n. 1, p. 1–15, 2009.

SAENKO, N. et al. The social responsibility of a scientist: Philosophical aspect of contemporary discussions. **Journal of Social Studies Education Research**, v. 10, n. 3, p. 332–345, 2019.

SALVETTI, C. The birth of nuclear energy: Fermi's pile. *In*: BERNARDINI, C; BONOLIS, L. (org.). **Enrico Fermi**. 1 ed. New York. p. 177–203, 2004.

SANTIN FILHO, O. Breve Histórico dos Cem Anos da Descoberta dos Raios X: 1895-1995. **Química Nova,** 1995.

SANTOS, K. C. et al. **Diálogo: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: Moderna, 2020

SCHMIEDECKE, W. G; PORTO, P. A. Abordagem da história da energia nuclear para a formação de professores de física. **Revista Brasileira de História da Ciência**, v. 7, n. 2, p. 232–241, 2014.

SCHUURBIERS, D. **Social Responsibility in Research Practice**. 2010. 165 f. Tese (Doutorado) - Technische Universiteit Delft, *Delft*, 2011.

SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks**. 1 ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987.

SERBER, R. **The Los Alamos PrimerThe Los Alamos Primer**. 26 p. 1943.

SMITH, P. D. **Os Homens do fim do Mundo: O verdadeiro Dr. Fantástico e o sonho da arma total**. 1 ed., São Paulo: Companhia das Letras, 2008.

Society for Social Responsibility in Science. **Science**, v. 118, n. 3076, p. 3–3, 1953.

SOUZA, D. A; CUNHA, C. V. A. Física nuclear no ensino médio: uma sequência didática com enfoque CTS. **Ensino em Foco**, v. 1, n. 2, p. 44–54, 2018.

SOUZA, M. A. M; DANTAS, J. D. Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensíno médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 136–158, 2010.

STIMSON, H. L. et al. **Notes of the Interim Committee Meeting**. 1945.

SYNGE, R. L. M. The Scientist's Responsibilities. **Nature**, v. 172, n. 4367, p. 62–64, 1953.

SZILARD, L. What is wrong with us?. 1942. *In*: **Leo Szilard: His Version of the Facts Selected Recollections and Correspondence**. v. 2, p.153-160. 1978.

_____. **Leo Szilard: His Version of the Facts Selected Recollections and Correspondence**. v. 2, p. 239, 1978.

TELLER, E. [Carta] 2 jul. 1945, Santa Fé [para] SZILARD, L., Chicago. Document 104. *In*: **Leo Szilard: His Version of the Facts Selected Recollections and Correspondence**. v. 2, p. 208, 1978.

_____. Atomic Scientists Have Two Responsibilities. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 3, n. 12, p. 355–356, 1947.

THOMSON, J. J. XXIV. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure. **Philosophical Magazine Series 6**, v. 7, n. 39, p. 237–265, 1904.

_____. Cathode Rays. **Philosophical Magazine**, v. 44, n. 269, p. 293–316, 1897.

THOMPSON, M. et al. **Conexões: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**. São Paulo: Moderna, 2020.

TORRES, C. M. A. et al. **Física: ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2016.

UREY, H. C. et al. Comments on Dr. Bridgman's Article. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 4, n. 3, p. 72–75, 1948.

VÁLIO, A. B. M. et al. **Física**. 3. ed., São Paulo: SM, 2016.

VASCONCELLOS, C. M. E; MANSANI, R. S. As conferências internacionais de yalta e potsdam e sua contribuição à construção da hegemonia econômica internacional norte americana no capitalismo do após 2ª guerra mundial. **Relações Internacionais do Mundo Atual**, v. 2, n. 16, p. 41–55, 2013.

VERHOOG, H. The Responsibilities of Scientists. **Minerva**, v. 19, n. 4, p. 582–604, 1981.

VILLARD, P. U. Sur la rèflexion et la rèfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium. **Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences**, v. 130, p. 1010–1012, 1900.

WALL, C. E. The bulletin of the atomic scientists. **Serials Review**, v. 1, n. 4, p. 11–15, 1975.
WEAVER, W; et al. The Moral Un-Neutrality of Science. **Science**, v. 133, n. 3448, p. 255–262, 1961.
WERNER, C. T. R. et al. Proposta para abordagem de tópicos de Física Nuclear no ensino médio: análise de atividades com professores de Física em formação inicial. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n. 1, p. 513–537, 2021.
YAMAMOTO, K.; FUKE, L. F. **Física para o ensino médio**. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.