

SILVIA OLIVEIRA RESQUETTI

**UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA
RADIOATIVIDADE NO NÍVEL MÉDIO, COM ENFOQUE NA
HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA E NO MOVIMENTO CTS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática do Centro de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência e a Matemática.

Área de concentração: Ensino de Ciências e Matemática

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Polonia Altoé Fusinato

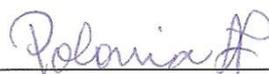
**MARINGÁ
2013**

SILVIA OLIVEIRA RESQUETTI

Uma sequência didática para o ensino da radioatividade no nível médio com enfoque na História e Filosofia da Ciência e no movimento CTS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática do Centro de Ciências Exatas da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Educação para a Ciência e a Matemática.

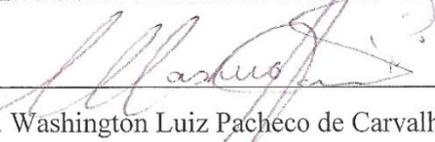
BANCA EXAMINADORA



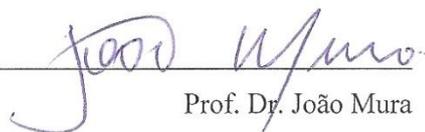
Prof. Dra. Polonia Altoé Fusinato
Universidade Estadual de Maringá – UEM



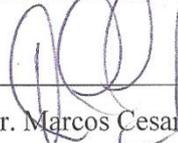
Prof. Dra. Irinéa de Lourdes Batista
Universidade Estadual de Londrina – UEL



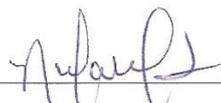
Prof. Dr. Washington Luiz Pacheco de Carvalho
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”



Prof. Dr. João Mura
Universidade Estadual de Maringá – UEM



Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves
Universidade Estadual de Maringá – UEM



Prof. Dra. Neide Maria Michellan Kiouranis
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Maringá, 21 de outubro de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

Ao meu marido, que sempre enalteceu o meu trabalho de educadora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Prof^a Dr^a Polônia Altoé Fusinato, pela valorosa e precisa orientação, pela confiança, pelo incentivo. Polônia, sempre tão determinada e incansável, não mediu esforços para tornar possível a conclusão de meu Doutorado.

Ao Prof. Dr. João Mura, pela revisão dos capítulos dedicados à evolução histórica da radioatividade e aos conteúdos conceituais para o Ensino Médio. O Professor Mura, sempre muito gentil e atencioso, contribuiu significativamente para a elaboração desses capítulos.

Ao meu amigo, Ricardo Francisco Pereira, com quem compartilhei os problemas, ajudou-me nessa caminhada e contribuiu com sugestões que enriqueceram o meu trabalho.

Ao Conselho Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática (PCM), pela compreensão e pelo atendimento às solicitações que se fizeram necessárias ao longo do curso.

Ao Núcleo Regional de Educação de Maringá, que gentilmente colocou à nossa disposição a tabulação dos livros didáticos de Física adotados em 2012 pelas escolas estaduais da região.

Aos meus pais, que me ensinaram a ter fibra e nunca desistir diante das dificuldades.

Ao meu marido, aos meus dois filhos e minhas noras, pela compreensão, apoio e paciência.

Pense nas crianças mudas
Telepáticas
Pense nas meninas cegas
Inexatas
Pense nas feridas como rosas
Cálidas
Mas! Não se esqueça da rosa, da rosa
Radioativa
Estúpida
Inválida
Sem cor
Sem perfume
Sem nada

(Vinícius de Moraes)

A inserção da Física Moderna e Contemporânea no currículo do Ensino Médio é um tema que vem sendo amplamente discutido por pesquisadores da área de ensino de Física desde o final da década de 1970, porém há evidências de que a atualização do currículo com a inserção da Física Moderna e Contemporânea ainda não corresponde às expectativas. Pesquisas (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005; OLIVEIRA, VIANNA; GERBASSI, 2007; SIQUEIRA; PIETROCOLA, 2007) apontam que são escassos os estudos que apresentam propostas para o ensino desses conteúdos. Desse modo, decidimos elaborar uma proposta metodológica para o ensino da radioatividade no Nível Médio, com enfoque nas relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e na História e Filosofia da Ciência (HFC). Para a construção da proposta, investigamos como o tema *radioatividade* é apresentado nos livros didáticos de Física do PNLD/2012. Além das obras didáticas, aplicamos um questionário a dez professores de Física da rede pública de ensino do Paraná, com o intuito de buscar dados informativos sobre o que eles pensam e vivenciam a respeito do tema. Optamos pela Análise de Conteúdo, de Bardin (1977), para analisar as obras didáticas e as respostas dos professores. Com base nos resultados obtidos na investigação, elaboramos uma sequência didática para o ensino da radioatividade no Nível Médio. A proposta metodológica preliminar foi apresentada aos professores e, durante o encontro, o grupo foi convidado a avaliar as atividades e a realizar intervenções pedagógicas. A partir das sugestões dos docentes, a sequência didática foi reconstruída de modo a atender às expectativas dos professores envolvidos.

Palavras-chave: Física Moderna e Contemporânea. Radioatividade. Ensino Médio. Professores de Física.

The insertion of Modern and Contemporary Physics in the curriculum of High school is a topic that has been widely discussed by researchers in Physics teaching since the late 1970s, however there is evidence that updating the curriculum with the insertion of Modern and Contemporary Physics still does not meet expectations. Researches (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005; OLIVEIRA, VIANNA; GERBASSI, 2007; SIQUEIRA; PIETROCOLA, 2007) indicate that there are few studies that present proposals for the teaching of these topics. Thus, we decided to develop a methodological proposal for the teaching of radioactivity in High school, focusing on the relationship between Science, Technology and Society (STS) and History and Philosophy of Science (HPS). For the construction of the proposal, we investigated how the theme radioactivity is presented in textbooks of physics of PNLD/2012. In addition to the textbooks, we applied a questionnaire to ten physics teachers of public schools of Paraná, aiming to get informative data about what they think and experience on the subject. We chose the Analysis of Content, of Bardin (1977), to analyze textbooks and the teachers' answers. Based on the results obtained in the investigation, we developed a didactic sequence to the teaching of radioactivity in High School. The primary methodological proposal was presented to the teachers and, during the meeting, the group was asked to evaluate the activities and accomplish educational interventions. From the suggestions of the teachers, the didactic sequence was reconstructed to meet the expectations of the teachers involved.

Keywords: Modern and Contemporary Physics. Radioactivity. High School. Physics Teachers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Primeiro reator nuclear, o Chicago Pile-1 (CP-1)	59
Figura 2	Locais de pesquisa importantes do Projeto Manhattan, nos EUA	61
Figura 3	Gráfico da porcentagem de pessoas mortas em Hiroshima em relação à distância do hipocentro de explosão da bomba atômica	68
Figura 4	A) Vareta de combustível com pastilha; B) Elemento combustível de um reator tipo PWR	77
Figura 5	Elemento combustível com barras de controle	77
Figura 6	Esquema simplificado do vaso de aço (núcleo) de um reator	78
Figura 7	Esquema simplificado do edifício e da contenção de aço do reator tipo PWR ..	79
Figura 8	Representação esquemática do reator a água pressurizada tipo PWR	80
Figura 9	Esquema simplificado de um reator a água fervente (BWR)	81
Figura 10	Encaminhamentos das atividades da sequência didática	175
Figura 11	Mapa indicando o ponto onde ocorreu o epicentro do terremoto na costa leste do Japão, em 11/03/2011.	178
Figura 12	Mapa ilustrando o epicentro do terremoto e a localização do complexo nuclear de Fukushima Daiichi	179
Figura 13	Vista aérea da usina nuclear de Fukushima I e do quebra-mar, antes de 11/03/2011	179

Figura 14	Momento em que as ondas do tsunami ultrapassaram a barragem de contenção e inundaram a central nuclear de Fukushima Daiichi	180
Figura 15	Edifício do reator nº 1 após a explosão ocorrida no dia 12/03/2011	181
Figura 16	Tubo de Crookes	186
Figura 17	Wilhelm Conrad Röntgen	187
Figura 18	Ilustração representando as observações de Röntgen ao colocar a mão entre o tubo de Crookes e o anteparo.....	188
Figura 19	Raio X da mão da Sra. Anna Bertha Ludwig, esposa de Röntgen	188
Figura 20	Ilustração dos raios X da mão direita de Albert von Kölliker, presidente honorário da Associação de Física e Medicina	189
Figura 21	Antoine Henri Becquerel	189
Figura 22	Marie Curie	191
Figura 23	Ernest Rutherford	192
Figura 24	Ilustração do modelo atômico didático	196
Figura 25	Mapa conceitual para estudo do modelo atômico didático	197
Figura 26	Representação do arranjo experimental para detecção das três radiações nucleares α , β e γ , emitidas por uma amostra de material radioativo	199
Figura 27	Curva representativa de decaimento radioativo	205
Figura 28	Representação da massa de uma amostra radioativa em função do tempo de meia-vida	205

Figura 29 Ilustração da fissão do urânio-235 207

Figura 30 Ilustração da reação em cadeia do urânio-235 209

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1	Principais dificuldades apontadas por pesquisadores da área de Ensino de Física para a inserção da FMC no Nível Médio	30
Tabela 1	Intervalo de dose absorvida por um indivíduo exposto uniformemente à radiação aguda no corpo todo, e o tempo de vida até a morte	73
Quadro 2	Livros didáticos de Física do PNLD/2012 e o número de escolas do Núcleo Regional de Educação de Maringá - Pr que adotaram cada um deles	116
Quadro 3	Obras didáticas que contemplam o tema radioatividade	145
Quadro 4	Enfoque CTS, Ciência Pura e HFC na apresentação dos conteúdos conceituais	147
Quadro 5	Conteúdos conceituais abordados pelos autores das obras didáticas	148
Quadro 6	Ênfase na abordagem dos exercícios propostos	150
Quadro 7	Formação acadêmica dos sujeitos da pesquisa, o tempo de docência na disciplina de Física e as modalidades e séries em que atuam no Ensino Médio	153
Quadro 8	Levantamento das principais dificuldades apontadas pelos professores para o ensino e aprendizagem de FMC no Nível Médio e a percentagem das respostas	155
Quadro 9	Classificação da maior para a menor dificuldade para o ensino da FMC no Ensino Médio e a frequência com que cada item foi apontado pelos professores entrevistados	156

Quadro 10	Recursos didático-pedagógicos que os professores julgam fundamentais para pesquisa, estudo e preparação de aulas de temas de FMC	160
Quadro 11	Esquema de organização das atividades da sequência didática	174
Tabela 2	Meia-vida de alguns radioisótopos usados em medicina	206

INTRODUÇÃO	16
 Capítulo 1º	
OS PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS PARA O ENSINO MÉDIO E A LINHA DE PESQUISA <i>FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA</i>	18
1.1. As dificuldades para a renovação do currículo de Física no Ensino Médio: o que mostram as pesquisas	21
1.1.1. Impressões extraídas das pesquisas	30
 Capítulo 2º	
A RADIOATIVIDADE E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO NO NÍVEL MÉDIO	33
2.1. A escolha do tema de pesquisa: o ensino da radioatividade no Nível Médio ..	33
2.2. A abordagem histórico-filosófica no ensino de Física	35
2.3. O enfoque Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) no ensino de Física	38
 Capítulo 3º	
RADIOATIVIDADE: UM BREVE HISTÓRICO	44
3.1. O tubo de Crookes e os raios X	44
3.2. Radioatividade: da detecção do fenômeno à compreensão de sua natureza ...	47
3.3. O início da Era Nuclear	53
3.3.1. A carta de Einstein ao presidente Roosevelt	54
3.3.2. O Projeto Urânio: primeiro reator de fissão	58
3.3.3. O Projeto Manhattan	60
 Capítulo 4º	
RADIAÇÕES NUCLEARES: EFEITOS, RISCOS E BENEFÍCIOS	70
4.1. Os efeitos biológicos nocivos da radioatividade	70
4.2. Os reatores de fissão e as usinas termonucleares	75
4.2.1. Afinal, o que é urânio enriquecido? O ciclo do combustível nuclear e a destinação dos rejeitos radioativos	82

4.2.2. Usina termonuclear: opção competitiva, os riscos e as perspectivas futuras	84
4.3. Radiações nucleares e suas aplicações	91
4.4. Lições dos acidentes nucleares e radioativos	99
4.4.1. O acidente nuclear de Three Mile Island	100
4.4.2. A catástrofe nuclear de Chernobyl	101
4.4.3. O acidente radioativo de Goiânia	106
4.4.4. O desastre radioativo de Fukushima Daiichi	110

Capítulo 5º

A PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O ENSINO DA RADIOATIVIDADE

NO NÍVEL MÉDIO	115
5.1. O referencial teórico: Análise de Conteúdo de Bardin	118
5.2. Sequência didática: uma metodologia de ensino	119
5.3. A radioatividade nos livros didáticos de Física do PNLD/2012: análise das obras didáticas	122
5.3.1. Resultados da análise dos livros didáticos	144
5.4. A pesquisa com os professores de Física do Ensino Médio	151
5.4.1. Resultados da análise do questionário	153
5.5. Visão geral das atividades da sequência didática	166

Capítulo 6º

SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA RADIOATIVIDADE NO

NÍVEL MÉDIO	172
6.1. Apresentação: aos professores de Física do Ensino Médio	172
6.1.1. Esquema de organização da sequência didática	174
6.1.2. Encaminhamentos das atividades	175
6.2. Atividade 1 – Introdução do problema social: o acidente radioativo de Fukushima	176
6.3. Atividade 2 - Radioatividade: um breve histórico	184
6.4. Atividade 3 - Radioatividade: conteúdos propostos para o Ensino Médio ...	193
6.5. Atividade 4 - Radiações nucleares: efeitos, riscos e benefícios. Aplicações na medicina, indústria, agricultura, pesquisa e ambiente	212
6.6. Atividade 5 - As bombas atômicas e os acidentes nucleares e radioativos ...	213

6.7. Atividade 6 - Retorno ao problema social original: causas e consequências do acidente radioativo de Fukushima e as perspectivas do uso da energia nuclear para geração de eletricidade	214
CONCLUSÃO	216
REFERÊNCIAS	222
REFERÊNCIAS DAS OBRAS DIDÁTICAS	232
REFERÊNCIAS DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	233
APÊNDICES	241
APÊNDICE A Radiações nucleares: conteúdos propostos para o Ensino Médio	242
APÊNDICE B Questionário para professores de Física do Ensino Médio	272
ANEXOS	277
ANEXO A Séries radioativas naturais	278
ANEXO B Tipos de reatores nucleares de potência	279
ANEXO C Tabela - Efeitos da radio-exposição aguda em um indivíduo adulto	280

O inesperado acidente radioativo ocorrido em 11 de março de 2011 na cidade de Fukushima, Japão, reacendeu o temor e a rejeição do uso de energia nuclear para geração de eletricidade. O evento, provocado por um terremoto seguido de um *tsunami* de grandes proporções, atingiu a estrutura da usina nuclear de Fukushima Daiichi, causando o vazamento de material radioativo dos reatores que foram danificados.

O fato teve grande repercussão mundial. Na ocasião, notícias sobre o vazamento radioativo eram constantes em todos os noticiários. Nas escolas, o fato chamou a atenção de estudantes, que queriam entender o que estava acontecendo. Os questionamentos deixaram evidente a necessidade da abordagem do tema nas aulas de Física e de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC).

Segundo Ostermann e Moreira (2000), as primeiras discussões a respeito da inserção da Física Moderna e Contemporânea no currículo do Ensino Médio datam do final dos anos 70. Embora haja certa unanimidade entre os pesquisadores quanto à necessidade da introdução da FMC no Nível Médio, a literatura mostra que ainda são escassas as propostas de ensino para a sala de aula, uma vez que não há um consenso *sobre o quê* abordar e de *como* fazê-lo (SORPRESO; BABICHAK; ALMEIDA, 2010). Pensamos, então, em elaborar uma proposta metodológica para o ensino da radioatividade no Nível Médio. Sustentamos que atividades de ensino na perspectiva Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), associadas ao enfoque da História e Filosofia da Ciência (HFC), podem contribuir para a efetiva inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea e com a renovação do ensino de Física. O acidente radioativo de Fukushima e o interesse despertado entre os alunos nos motivou para a escolha do tema.

Entre as diversas metodologias ou formas de ensinar, optamos pela “sequência didática”, sobretudo pela maneira como as atividades podem se inter-relacionar. Para a construção da sequência didática, investigamos como o tema é tratado nos livros didáticos de Física do PNLD/2012. A análise das obras nos auxiliou na elaboração da proposta, porquanto o livro didático figura como um dos principais aliados do professor no processo de ensino.

Além dos livros didáticos, realizamos uma sondagem, por meio de questionário, entre dez professores de Física do Ensino Médio que lecionam na rede pública de ensino do Paraná. Oito dos professores entrevistados faziam parte do Programa de Desenvolvimento Educacional (PDE), ano 2012, da Secretaria de Estado da Educação, e um professor já havia

participado do mesmo programa em 2007. O questionário foi usado como instrumento para a coleta de opiniões e dados informativos, para que estruturássemos a proposta metodológica a partir das interpretações das respostas. Optamos pela Análise de Conteúdo, de Bardin (1977), para analisar as obras didáticas e as respostas dos professores, aplicando o critério das categorias temáticas.

A sequência didática foi apresentada ao grupo de professores durante um curso de formação continuada, com duração de doze horas. Durante o encontro os professores foram convidados a participar da reconstrução da proposta. A sequência didática foi discutida e analisada pelos docentes, que contribuíram significativamente com diversas sugestões.

OS PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS PARA O NÍVEL MÉDIO E A LINHA DE PESQUISA *FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA*

Os primeiros estudos publicados que tratam da questão do ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) datam do final dos anos 70. Segundo Ostermann e Moreira (2000), nos Estados Unidos da América a discussão em torno da inserção da FMC no currículo do Ensino Médio e nos cursos introdutórios de graduação ganhou força após a *Conferência sobre o Ensino de Física Moderna*, realizada na cidade de Batavia, Illinois, em 1986. O debate propagou-se por todo o mundo, levando ao desenvolvimento de pesquisas que apontaram diversas razões para a atualização do currículo de Física e a introdução de conteúdos contemporâneos.

Desde então, um número considerável de trabalhos nacionais e internacionais mostrou que a renovação do programa de ensino de Física no Ensino Médio era incontestável (BALTHAZAR; OLIVEIRA, 2010; BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005; CARVALHO; VANNUCCHI, 1996; OSTERMANN; MOREIRA, 2000, 2001; PEREZ; SOLBES, 2003; PINTO; ZANETIC, 1999; TERRAZZAN, 1992; VALADARES; MOREIRA, 1998). Vários países, preocupados em preparar os jovens para uma sociedade em constante evolução tecnológica, passaram a incluir conteúdos de FMC em seus currículos oficiais (LOBATO; GRECA, 2005; SIQUEIRA, PIETROCOLA; UETA, 2007).

No Brasil não foi diferente. A partir dos princípios definidos na Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB – Lei 9.394/96) de 1996, o Ministério da Educação (MEC), em um trabalho conjunto com educadores de todo o país, elaborou, em 1998, as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM). As DCNEM constituem-se em um documento de reforma curricular do Ensino Médio apoiado no domínio de competências básicas, e não no acúmulo de informações (BRASIL, 1999). A reforma educacional veio atender os anseios de pesquisadores brasileiros da área de Ensino de Física (CARVALHO; VANNUCCHI, 1996; TERRAZZAN, 1992), que nos anos 80 aderiram ao movimento mundial de renovação curricular e da inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

Para a implementação das DCNEM, o MEC produziu os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) para o Ensino Médio, com o intuito de difundir os princípios da reforma

curricular e, ao mesmo tempo, orientar os professores na busca de novas abordagens e metodologias; porém essa implementação implica um processo de ruptura e de transição, de modo a levar os profissionais da educação a reverem sua prática sobre *o quê* e *como* ensinar.

Os PCNs apresentam as propostas pedagógicas para cada área¹ e para cada disciplina. Segundo o documento, “o ensino de Física deve contribuir para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais” (BRASIL, 1999, p. 228). Para tanto, a escola deve promover um conhecimento físico contextualizado e integrado à vida do jovem e considerar o seu mundo vivencial próximo e distante, os fenômenos naturais e os dispositivos tecnológicos com que lida no seu cotidiano, que são os objetos que movem a sua curiosidade. A Física deve ser reconhecida como uma construção humana cujo processo histórico iniciou-se na Antiguidade e continua até os dias de hoje e é objeto de contínua transformação. O texto explicita de que forma as tecnologias podem e devem ser abordadas e ressalta a importância de entender as relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente, a capacidade de avaliação de riscos e benefícios na utilização de dispositivos tecnológicos e a responsabilidade social e ética na tomada de decisões em que os aspectos físicos e tecnológicos são relevantes. Para a necessária atualização do conteúdo de Física e suas aplicações tecnológicas, os PCNs indicam uma especial ênfase à Física Moderna e Contemporânea (FMC) ao longo de todo o curso, não como tópicos abordados isoladamente, mas como desdobramentos de outros conhecimentos.

Os PCNs+, publicados em 2002, apresentam orientações complementares aos PCNs. Expressam com mais clareza o conhecimento de Física que se pretende proporcionar no Ensino Médio, no sentido de contribuir para a formação de um cidadão “atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade” (BRASIL, 2002, p. 59). A referência primeira que orienta a ação pedagógica deixa de ser *o quê ensinar*, dando lugar ao *para quê* ensinar Física. Nessa perspectiva mais ampla, o conhecimento adquire significado no momento em que é ensinado e o aluno é preparado “para ser capaz de lidar com situações reais, crises de energia, problemas ambientais, manuais de aparelhos, concepções de universo, exames médicos, notícias de jornal [...]” (BRASIL, 2002, p. 62). O documento orienta para a abordagem da FMC no Ensino Médio, no sentido de dar ao jovem condições de não só compreender e acompanhar o desenvolvimento científico e tecnológico

¹São três grandes áreas do conhecimento: i) Linguagens, Códigos e suas Tecnologias; ii) Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias; iii) Ciências Humanas e suas Tecnologias. Cada área agrupa as disciplinas com objetivos em comum.

contemporâneos, mas também de ser um cidadão crítico e participativo na sociedade em que vive.

O movimento a favor do ensino de Física Moderna e Contemporânea no Nível Médio tornou esta área uma importante linha de investigação em Educação em Ciências. Entre os estudos publicados, a revisão de literatura realizada por Ostermann e Moreira (2000) não só identifica as contribuições e as tendências nos anos 80 e 90, mas também nos dá uma visão muito bem fundamentada de como estava o processo de renovação curricular de Física no referido período. Os trabalhos consultados pelos autores apresentam as justificativas para a inserção da FMC no currículo do Ensino Médio, as investigações realizadas sobre as concepções alternativas dos estudantes, os temas abordados, as propostas metodológicas e os projetos de ensino testados em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem.

O estudo de Ostermann e Moreira (2000) apresenta os tópicos de FMC indicados para o Nível Médio. Na lista obtida pelos autores junto a físicos, pesquisadores em Ensino de Física e professores de Física do Ensino Médio, os temas mais indicados foram: efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, leis de conservação, dualidade onda-partícula, radioatividade, forças fundamentais, fissão e fusão nuclear, origem do Universo, raios-X, metais e isolantes, semicondutores, *laser*, supercondutores, partículas elementares, relatividade restrita, Big Bang, estrutura molecular e fibras ópticas. Os pesquisadores complementam o estudo com uma análise sobre a abordagem da FMC em cinco livros didáticos, entre eles dois estrangeiros. Concluem que são muitas as justificativas a favor da inserção da FMC no currículo do Ensino Médio, contudo reconhecem que, no final do século XX, tornar essas reflexões uma realidade em sala de aula ainda era um desafio.

Pereira e Ostermann (2009) realizaram um novo levantamento sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea no Nível Médio e no Superior, posterior à revisão de Ostermann e Moreira (2000). Os autores analisaram 102 artigos publicados entre 2001 e 2006 nas principais revistas especializadas em ensino de Ciências no Brasil e no exterior. O levantamento permitiu classificarem os trabalhos em quatro grandes categorias: i) propostas didáticas testadas em sala de aula; ii) levantamento de concepções de professores e estudantes; iii) bibliografia de consulta para professores; iv) análise curricular.

Entre os 102 artigos consultados, Pereira e Ostermann (2009) constataram que 52 abordam a *bibliografia de consulta para professores* - categoria 3. Os demais 50 trabalhos apresentam resultados de pesquisa e, entre estes, destacou-se a categoria 2 - *concepções dos estudantes* acerca da FMC, com 16 artigos (32% de 50 artigos). Quanto à tendência dos temas

pesquisados entre os anos de 2001 e 2006, é interessante observar que, entre os 50 trabalhos, a Mecânica Quântica é o tema mais abordado, com 26 artigos (52%), seguido da Relatividade Especial e Relatividade Geral, com 11 artigos (22%). Os demais temas - como radiação, supercondutividade, física de partículas, física nuclear, armas nucleares e outros - são abordados em 13 trabalhos (26% de 50 artigos). Nota-se que radioatividade é um conteúdo pouco abordado nos artigos analisados pelos autores.

Ainda entre os 50 trabalhos de pesquisa, o levantamento de Pereira e Ostermann (2009) mostrou que 22 deles referem-se à inserção da FMC no Ensino Médio; contudo, somente 14% desses trabalhos, ou 6,9% do total da amostra (102 artigos), envolvem professores de Física em exercício ou em formação inicial, índice considerado muito baixo pelos autores, diante da relevância desta linha de pesquisa na área de ensino de Ciências. É possível observar, por meio desse estudo, que são escassas as propostas didáticas testadas em sala de aula (categoria 1). Faz-se necessário ampliar as investigações que tratam de *como* abordar conteúdos de FMC no Ensino Médio e, ao mesmo tempo, envolver os professores que atuam nesse nível de ensino.

A pesquisa com caráter bibliográfico “possibilita que lacunas existentes na área investigada sejam evidenciadas e conseqüentemente, indicam alguns rumos ainda necessários de serem seguidos pelos pesquisadores” (MONTERIO; NARDI, 2007, p. 1). Os levantamentos realizados por Ostermann e Moreira (2000) e Pereira e Ostermann (2009) são norteadores para a linha de Ensino de FMC, pois, além de destacarem as tendências e contribuições das pesquisas, indicam que a inserção da FMC nas salas de aula do Nível Médio ainda caminha a passos muito lentos.

1.1. AS DIFICULDADES PARA A RENOVAÇÃO DO CURRÍCULO DE FÍSICA NO ENSINO MÉDIO: O QUE MOSTRAM AS PESQUISAS

A Física é parte fundamental dos pilares onde se apoia a tecnologia contemporânea. Está presente em grande parte de objetos de uso cotidiano. O aparelho de GPS (sigla inglesa para Sistema de Posicionamento Global), usado por navios, naves espaciais, frotas de caminhões, motoristas de automóveis e montanhistas, é capaz de determinar posições tanto no espaço quanto no solo, com erro menor do que um metro. As telecomunicações por meio das fibras ópticas associadas à descoberta do raio *laser*, os equipamentos de imagem por

ressonância magnética nuclear capazes de identificar lesões cancerígenas com dimensões de fração de milímetro, a produção de *chips* cada vez mais densos, que possibilita o armazenamento de informação digital, são apenas alguns exemplos das invenções derivadas das descobertas de fenômenos físicos. Essas criações estão associadas à pesquisa em Física Moderna e Contemporânea, que alimenta o progresso tecnológico (SBF, 2005).

Embora a FMC seja a base na qual se apoia a tecnologia contemporânea, muitas vezes o ensino de Física no Nível Médio desconsidera a abordagem desse tema em sala de aula. Conforme apontam as pesquisas, há indícios da existência de obstáculos à efetiva introdução dos conteúdos no Ensino Médio e essas dificuldades começam com a implementação dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs).

Os Parâmetros Curriculares Nacionais, PCNs e PCNs+ para a disciplina de Física “[...] enunciam a necessidade de modificações dos objetivos educacionais, perpassando por alterações nas práticas, estratégias e ações em sala de aula, bem como no papel de alunos e de professores no espaço escolar” (SASSERON, 2010, p. 10). Os documentos orientam para a abordagem da Física Moderna e Contemporânea no sentido de formar cidadãos críticos e capazes de acompanhar o desenvolvimento científico e tecnológico da sociedade contemporânea.

Não obstante, a implementação da proposta não aconteceu da forma esperada. A Sociedade Brasileira de Física (SBF), ao realizar um levantamento sobre a situação do ensino de Física no Brasil em 2003, reconheceu que:

A implementação desta proposta [PCN], apesar de ter penetrado no imaginário do professor, ainda enfrenta sérias dificuldades e entraves de um sistema desestimulador, carente de lideranças, e com vícios que devem ser erradicados com a firmeza e seriedade que a situação exige. Mesmo com alguns estudos feitos, a já antiga intenção de introduzir a física moderna na escola média, e no ciclo básico superior, ainda está longe de ser concretizada (SBF, 2003, p. 258).

Ricardo (2003) comenta que há uma distância entre o que está proposto nos documentos oficiais e a prática escolar. Segundo o autor, as dificuldades “vão desde problemas com a formação inicial e continuada a pouca disponibilidade de material didático-pedagógico; desde a estrutura verticalizada dos sistemas de ensino à incompreensão dos fundamentos da lei, das Diretrizes e Parâmetros” (RICARDO, 2003, p. 18).

As pesquisas realizadas por Ricardo e Zylbersztajn (2002; 2004) mostram algumas das dificuldades dos professores na implementação dos PCNs na escola média. Um dos estudos (2002) envolveu um grupo de docentes do Ensino Médio da área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, a direção e a equipe pedagógica de uma escola de grande porte da Região Sul. O Núcleo Regional de Educação (NRE) ao qual a escola estava subordinada também foi consultado. Embora a investigação não tenha se concentrado na disciplina de Física, o foco foi a área na qual esta ciência está inserida.

De acordo com os autores, um dos problemas para a implementação dos PCNs foi a forma como a proposta foi divulgada e discutida, tanto entre os grupos de apoio quanto entre os professores da escola. Os pesquisadores comentam que os professores sentiram dificuldades em reorientar suas práticas pedagógicas, uma vez que não houve uma discussão mais ampla que lhes permitisse se apropriar do conteúdo em sua totalidade. A interpretação equivocada dos documentos oficiais, como a compreensão ambígua da parte diversificada e de conceitos como os de competências, habilidades e interdisciplinaridade, também contribuiu para o entrave na implementação da reforma curricular.

O estudo de Ricardo e Zylbersztajn (2002) aponta outras dificuldades, como a expressiva falta de docentes habilitados e concursados em Física, que implica na contratação de licenciados em outros cursos da área de Ciências da Natureza e Matemática, em regime temporário de trabalho. Os pesquisadores destacam também o não prosseguimento das discussões da reforma de ensino entre os docentes, a resistência de alguns educadores em rever a sua prática pedagógica, a falta de cursos de formação continuada e a carência de material didático e bibliográfico compatível com os PCNs.

Em outro trabalho, Ricardo e Zylbersztajn (2004) comentam que os professores do Ensino Médio, ao mesmo tempo em que admitem a necessidade de mudanças em sua prática pedagógica, mostram-se resistentes em relação aos Parâmetros. Os pesquisadores sugerem que uma alternativa para a reorientação nas práticas educativas seria a formação dos futuros professores em sintonia com os documentos oficiais.

Para saber como está o direcionamento dos cursos de licenciatura em relação aos PCNs e PCNs+, Ricardo e Zylbersztajn (2004) investigaram o que pensam e como trabalham os professores do Ensino Superior que atuam na formação inicial de professores de Física. O estudo revelou que os Parâmetros são discutidos de maneiras diferentes e com maior ou menor intensidade pelos docentes das três instituições investigadas. Não obstante, na visão dos entrevistados, os licenciandos aceitam “a necessidade de mudança no ensino de física

corrente e os próprios PCNs, mas, por outro lado, entendem que é difícil, se não impossível, sua implantação em sala de aula” (RICARDO; ZYLBERSZTAJN, 2004, p. 5). A resposta dos entrevistados indica que há falta de sintonia entre a formação inicial de professores e as orientações dos documentos oficiais (PCNs).

Os trabalhos realizados por Ricardo e Zylbersztajn (2002; 2004) revelam que os documentos oficiais não são plenamente compreendidos pelo professor da Educação Básica. Isso é um problema, uma vez que o professor tem que conhecer as orientações a respeito de como o programa da disciplina deve se desenvolver ao longo de toda a vida educacional do estudante. Os PCNs e os PCN+ devem ser debatidos com mais entusiasmo pelos docentes que atuam nos cursos de formação inicial, como também entre os docentes e grupos de apoio do Ensino Básico, a fim de proporcionar ao professor uma visão bem fundamentada do conhecimento físico que se pretende proporcionar aos estudantes.

Além dos entraves citados, outros obstáculos dificultaram a implementação da proposta de reforma curricular. No Paraná, em 2003, durante um encontro com professores do Ensino Médio da rede estadual de ensino, a Secretaria de Estado da Educação (SEED) anunciou a exclusão dos PCNs nas escolas paranaenses (SANCHES et al., 2006). Na ocasião, a proposta do governo era a de elaborar novas diretrizes curriculares, com a participação do professor da rede estadual nas discussões. Entretanto,

A proposta da SEED era aquela de criar diretrizes/orientações estaduais aparentemente baseadas numa discussão com a coletividade dos professores. Essa “criação” coletiva levou quase todo o período do mandato do [então] governo, lançando os professores da rede pública num período de incertezas curriculares e de planejamento de ações didáticas (SANCHES et al. 2006, p. 3).

No ano de 2005, a SEED apresentou o texto preliminar contendo as orientações curriculares para a disciplina de Física, com base no resultado das discussões com os professores de Física representantes dos Núcleos Regionais de Educação (NRE) do Paraná. O documento apresentava os conteúdos considerados “estruturantes” e uma lista de conteúdos básicos. De acordo com Sanches et al. (2006, p. 5), as novas orientações representavam um retrocesso, “reduzindo toda a discussão pedagógica e epistemológica a uma lista de conteúdos, tal qual existia no último currículo do Estado, o de 1992”.

Em 2008, a SEED publicou o documento finalizado das Diretrizes Curriculares da Educação Básica para as disciplinas, fruto das discussões com professores ocorridas entre 2004 e 2006. Segundo o documento, os conteúdos “estruturantes” – Movimento, Termodinâmica e Eletromagnetismo – representam os conhecimentos e teorias que compõem os campos de estudo da Física e servem de referência para os conteúdos escolares. O texto apresenta, no final, um quadro contendo os conteúdos estruturantes e os conteúdos básicos correspondentes. De acordo com o documento, “cabará ao professor, a partir da proposta pedagógica e da matriz curricular da sua escola, selecionar os conteúdos específicos que comporão seus Planos de Trabalho Docente, nas séries do Ensino Médio em que a disciplina de Física for ofertada” (SEED, 2008, p. 58). Nota-se, contudo, que o documento se refere à Física Clássica; menciona, brevemente, a Física Moderna e Contemporânea.

Entendemos que algumas das dificuldades encontradas para inserir a FMC no currículo do Ensino Médio estão ligadas aos obstáculos para a implementação dos PCNs, pois a proposta de reforma curricular, além de contemplar conteúdos contemporâneos de Física, propõe o rompimento com as práticas tradicionais de ensino. Todavia, as dificuldades não se restringem aos PCNs. Pesquisas revelam que são diversos os obstáculos que desafiam a efetiva inserção dos conteúdos em sala de aula, dentre os quais, o quadro docente, posto que 91% dos profissionais não possuem formação específica na área de Física; portanto, não têm incluído em seu currículo acadêmico de graduação nenhum componente de FMC.

O ensino de Física deve ser abrangente. Além da mecânica, termodinâmica, óptica geométrica, ondulatória e eletromagnetismo, o aluno deve ter conhecimento dos conceitos da Física desenvolvida a partir do século XX. Nessa linha de pesquisa, Chiarelli e Moreira (2006) procuraram investigar se é possível introduzir tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Os pesquisadores realizaram o estudo com alunos do 3º ano abordando somente conceitos, mas também fizeram uma sondagem entre os professores de Física para saber o que eles pensam sobre a inserção da FMC em sala de aula. No grupo entrevistado, a pesquisa aponta que dez dos treze professores tiveram conteúdos de FMC na graduação, porém apenas quatro haviam abordado algum tópico em suas aulas. Os motivos alegados pela ausência desses conteúdos foram: carga horária insuficiente, os temas serem difíceis e complexos para os alunos, desinteresse em implementar os PCNs, os estudantes apresentarem defasagem em Matemática Básica e falta de motivação para os estudos de Física. Os autores comentam que, ao mesmo tempo em que 69% dos professores admitiram não trabalhar

conteúdos de FMC, todos concordaram, com algumas restrições, que é necessário introduzir o tema no currículo do Ensino Médio.

Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007) entrevistaram dez professores de Física do Ensino Médio, com o intuito de verificar suas intenções quanto à inserção de tópicos de FMC em suas aulas, particularmente os raios X. Os autores constataram que apenas três dos dez docentes já haviam abordado superficialmente algum tópico, embora nove deles tenham se manifestado favoráveis à inserção. Quanto aos PCNs, quatro dos entrevistados disseram ter conhecimento do texto, porém os pesquisadores observaram em suas falas que as interpretações do conteúdo dos Parâmetros eram limitadas e equivocadas. A maioria dos professores, ao mesmo tempo em que se mostrou favorável à inserção do tópico raios X em sala de aula, apontou alguns problemas que limitariam a abordagem, como a insuficiência da carga horária semanal de Física na escola pública, a falta de material adequado para a abordagem do tema, a falta de atualização e capacitação do professor em relação a esse conhecimento, o fato de o conteúdo não ser cobrado em vestibulares e, também, as dificuldades cognitivas dos alunos da escola pública para entender a FMC.

A pesquisa realizada por Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) envolveu cinco docentes do Ensino Médio, licenciados em Física, de um estado da Região Nordeste. Todos os entrevistados haviam cursado, durante a graduação, componentes curriculares que tratavam de FMC. Os professores possuíam menos de cinco anos de formação na ocasião das entrevistas, portanto concluíram o curso de licenciatura em uma época em que a inserção da FMC no Ensino Médio já era uma questão indiscutível entre os pesquisadores. Os autores investigaram o que pensavam esses professores sobre a possibilidade de introduzirem a FMC em suas aulas, como também em que medida essas possibilidades estão associadas à sua formação inicial. O estudo revelou que todos os docentes reconhecem a relevância da inserção de conteúdos contemporâneos no Nível Médio, mas nenhum deles havia abordado o tema em sala de aula.

Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009), ao pesquisarem os motivos da ausência do ensino de FMC, apontaram alguns obstáculos que explicam por que os professores não abordam o tema. Os autores destacam lacunas na formação inicial dos docentes, entre elas a deficiência no ensino-aprendizagem de conteúdos de FMC em virtude de um excessivo formalismo matemático. Firmam os autores:

A adoção deste formalismo parece não ter contribuído para que os mencionados professores tenham construído uma visão conceitual, epistemológica e ontológica satisfatória da mencionada física, resultando na impossibilidade de eles fazerem as adequações pertinentes e introduzirem a FMC no nível médio da Educação Básica (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009, p. 573).

O trabalho de Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) apresenta outras dificuldades relatadas pelos entrevistados, como a formação inicial baseada na mera repetição dos conteúdos do livro didático recomendado; a carga horária semanal de Física na escola média, que, segundo os docentes, se já é insuficiente para a abordagem de conteúdos clássicos, quanto mais de FMC; o despreparo para o planejamento de estratégias de ensino para abordagem do tema, ou seja, *como ensinar* e *para quê ensinar*, e a falta de experiência profissional no tocante ao conteúdo. Na visão dos autores, todos esses problemas se refletiram nas atuações desses professores em sala de aula, o que explica a falta de entusiasmo e a ausência de conteúdos contemporâneos em seus planejamentos anuais de ensino. O resultado desse estudo evidencia um descompasso entre as propostas de pesquisadores da área de Ensino em FMC e as reais intenções dos professores que atuam no Ensino Médio. Os autores concluem que é possível perceber nos discursos dos docentes entrevistados as marcas de uma formação que não lhes garante um desempenho satisfatório para abordar temas de FMC na Educação Básica, fazendo-se urgente discutir outras perspectivas para a formação de professores de Física.

Para entender a ausência de conteúdos de FMC nos planejamentos de ensino de professores do Ensino Médio, Monteiro e Nardi (2009) investigaram em que medida os docentes dos cursos de licenciatura estão trabalhando na perspectiva de que esses conteúdos sejam introduzidos em sala de aula pelos futuros professores. Para isso, os autores entrevistaram cinco licenciandos do último semestre do curso de Física de uma universidade pública do Sudeste Brasileiro, que haviam cursado quatro componentes curriculares obrigatórias e uma optativa que contemplavam a FMC. Ao analisarem os discursos dos entrevistados, observaram que nenhum dos futuros professores demonstrou qualquer possibilidade ou viabilidade em inserir conteúdos de FMC em suas aulas. Os motivos são distintos. De acordo com os autores, um dos licenciandos argumentou que os estudantes do Ensino Médio teriam dificuldades cognitivas para compreender os conteúdos, em virtude de uma provável defasagem em Matemática. Tal argumento evidencia uma formação em FMC desse licenciando fundada no formalismo matemático. Na visão de outro entrevistado, os

estudantes da escola média teriam dificuldades em entender a Física Clássica, conseqüentemente, teriam também em FMC. Para os autores, os futuros professores julgam que os estudantes da Educação Básica têm possíveis dificuldades cognitivas para compreender a FMC, o que impossibilita, nessa perspectiva, a introdução desses conteúdos no Ensino Médio.

Monteiro e Nardi (2009) relatam que outros dois licenciandos do grupo entrevistado afirmaram não ter qualquer ideia em *como* abordar a FMC na sala de aula do Ensino Médio, nem jamais ter pensado sobre isto. Afirmam os pesquisadores:

O desconhecimento acerca de referenciais teóricos no tocante a introdução da FMC na educação básica, como também a declaração de nunca ter pensado na mencionada questão, evidencia que, ao contrário do que sugerem as pesquisas, o ensino da FMC até então não se mostra relevante no contexto em que os mencionados licenciandos estavam construindo as respectivas formações. Logo, há indícios de que os formadores de professores de Física da universidade que pertencem os entrevistados, não estão ouvindo as sugestões para a FMC ser introduzida na educação científica básica, sugestões proferidas por pesquisadores em ensino de Física [...] (MONTEIRO; NARDI, 2009, p. 5).

Segundo os autores, um dos licenciandos relatou ainda que, durante todo o curso, apenas em uma circunstância bastante pontual houve algum comentário a respeito da abordagem da FMC no Ensino Médio.

O estudo realizado por Monteiro e Nardi (2009) os levou a questionar a eficácia do ensino de FMC nos cursos de Licenciatura em Física. O ensino ainda se mostra baseado na racionalidade técnica. Na perspectiva dos pesquisadores, a formação dos futuros professores de Física do curso investigado mostrou-se inviável para que fossem capazes de inserir a FMC na escola secundária, no sentido de proporcionar ao estudante uma educação crítica e emancipatória. Concluem que é necessário propiciar aos futuros professores

[...] a autonomia requerida para tomada de decisões, tanto em termos do ensino de conteúdos em si, como também em relação às estratégias de ensino do mesmo, haja vista estarem às mesmas desarticuladas entre si. [...] Tal postura requer uma mudança radical tanto na estruturação do currículo quanto nas próprias concepções e atitudes daqueles docentes que trabalham com formação de professores de Física (MONTEIRO; NARDI, 2009, p. 9).

Entendemos que o desconhecimento de referenciais teóricos para a inserção da FMC na escola secundária constitui, para o docente, uma barreira difícil de ultrapassar. O professor sente-se inseguro ao abordar os conteúdos, uma vez que não tem ideia em *como fazer e para quê fazer*, ou seja, tem dificuldade em planejar as estratégias de ensino, elaborar as atividades e desenvolvê-las com seus alunos e por isso, ao planejar o programa curricular no início do ano letivo, evita inserir tópicos de FMC, limitando-se à Física Clássica e a um ensino pouco diferente daquele que foi oferecido quando se encontrava nos bancos escolares.

Sorpreso, Babichak e Almeida (2010) assinalam a necessidade de desenvolver trabalhos nos cursos de formação inicial de professores de Física buscando aproximar os licenciandos das pesquisas e recursos produzidos por pesquisadores da área de Ensino de Física; no entanto, os autores, que já trabalham nessa linha na formação inicial, afirmam que existem diversas dificuldades em inserir a FMC nas aulas dadas aos licenciandos. O futuro professor, que passou grande parte de sua vida escolar submetido às características de um sistema de ensino tradicional e limitador, tem dificuldades em modificar a imagem matematizada, a-histórica e descontextualizada que tem da Ciência e de seu ensino. Ao atuar em sala de aula, esse imaginário do professor acaba interferindo na sua prática escolar. Os autores destacam a importância de se levarem em consideração, na formação inicial de professores, situações que provoquem deslocamentos da imagem que o licenciando tem da Ciência, no sentido de torná-lo crítico e de fazê-lo refletir sobre as questões educacionais que irá ensinar no futuro.

A necessidade de uma estruturação nos cursos de Licenciatura em Física é também notada por Krey e Moreira (2009). Os autores, ao desenvolverem uma pesquisa com estudantes da disciplina Estrutura da Matéria do curso de Licenciatura em Ciências Exatas, comentam que conteúdos de FMC são abordados nos cursos de Bacharelado e de Licenciatura em Física com o mesmo enfoque, com destaque especial para os cálculos. A discussão conceitual e fenomenológica ganha pouca ênfase. De acordo com os pesquisadores, os futuros professores da Educação Básica não adquirem, com esse tipo de abordagem, subsídios suficientes para ensinar conteúdos de FMC no Ensino Médio. Entendemos que o enfoque no curso de Licenciatura em Física deve ser diferenciado do curso de Bacharelado, devendo o ensino ser conduzido de forma a dar aos futuros professores uma muito bem estruturada visão conceitual, filosófica e epistemológica da Física.

Esses estudos (KREY; MOREIRA, 2009; MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009; MONTEIRO; NARDI, 2009; SORPRESO; BABICHAK; ALMEIDA, 2010) indicam a

necessidade de uma reestruturação nos cursos de formação inicial em Física, de modo que os futuros professores sejam capazes de ensinar conteúdos de FMC com as necessárias adequações.

1.1.1. Impressões extraídas das pesquisas

Elaboramos o quadro 1 com o intuito de apresentar, de forma condensada, os obstáculos à inserção da FMC no Ensino Médio identificados a partir das pesquisas apresentadas neste capítulo. Procuramos mostrar as principais impressões extraídas dos textos e as interpretações dos pesquisadores.

AUTORES/ANO DE PUBLICAÇÃO DO ESTUDO	GRUPO INVESTIGADO	OBSTÁCULOS PARA A INSERÇÃO DA FMC NO ENSINO MÉDIO
1. RICARDO; ZYLBERSZTAJN (2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Professores do EM da área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades p/ a implementação dos PCNs por parte do professor do EM; • Resistência do professor do EM em reorientar sua prática pedagógica; • Carência de professores habilitados em Física; • Falta de cursos de formação continuada; • Carência de material didático e bibliográfico compatível com os PCNs.
2. RICARDO; ZYLBERSZTAJN (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Professores de três instituições de Ensino Superior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência do professor do EM em reorientar sua prática pedagógica; • Falta de sintonia entre a formação inicial do professor e os documentos oficiais (PCNs).
3. CHIARELLI; MOREIRA (2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Treze professores de Física do EM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Carga horária semanal de Física insuficiente para a inserção de tópicos de FMC no EM; • Desinteresse do professor em implementar os PCNs; • Conteúdos de FMC são complexos para o aluno do EM; • Aluno do EM apresenta defasagem em Matemática básica; • Desinteresse do estudante do EM pelos estudos de Física.
4. OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Dez professores de Física do EM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desconhecimento do professor com relação aos PCNs; • Carga horária semanal de Física insuficiente no EM;

		<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de material adequado; • Falta de cursos de atualização e capacitação com relação ao conteúdo; • O conteúdo não é cobrado em vestibular; • Alunos da escola pública teriam dificuldades cognitivas p/ entenderem os conteúdos de FMC.
5. MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Cinco professores de Física do EM licenciados em Física. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lacunas no ensino-aprendizagem em FMC durante a formação inicial; • Formação inicial pautada no formalismo matemático; • Formação inicial pautada na transmissão de conteúdos do livro didático recomendado; • Carga horária semanal de Física insuficiente para a inserção de tópicos de FMC no EM; • Despreparo do professor para o planejamento de estratégias de ensino; • Falta de experiência do professor no tocante aos conteúdos de FMC; • Descompasso entre as propostas de pesquisadores da área de Ensino em FMC e as intenções do professor do EM; • Adequar os conteúdos para o EM.
6. MONTEIRO; NARDI (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Cinco licenciandos do último semestre do curso de Licenciatura em Física de uma universidade pública. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alunos do EM teriam dificuldades cognitivas p/ entenderem os conteúdos de FMC; • Deficiências no ensino-aprendizagem em FMC durante a formação inicial pautada no formalismo matemático; • Licenciandos não sabem <i>como</i> abordar a FMC no EM, em virtude do desconhecimento dos referenciais teóricos para a introdução da FMC no EM (dificuldades em adequar os conteúdos p/ o EM). • Docentes dos cursos de formação inicial abordam brevemente a questão do ensino de FMC no EM. • Docentes dos cursos de Licenciatura em Física desconsideram as pesquisas sobre a inserção da FMC no EM.
7. KREY; MOREIRA (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • 37 Licenciandos do curso de Ciências Exatas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conteúdos de FMC são abordados com o mesmo enfoque nos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física; • Abordagem de FMC durante a formação inicial, com destaque especial ao formalismo matemático.

Quadro 1: Principais dificuldades apontadas por pesquisadores da área de Ensino de Física para a inserção da FMC no Nível Médio.

Com base na análise apresentada no quadro 1, é possível observar que são vários os entraves para a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Verificamos também que alguns desses obstáculos aparecem em mais de uma pesquisa, conforme expomos a seguir:

- Implementação dos PCNs (desconhecimento/desinteresse);
- Carga horária de Física no Ensino Médio insuficiente para inserção da FMC;
- Resistência do professor em reorientar sua prática pedagógica;
- Aluno do EM teria dificuldades cognitivas para compreender conteúdos de FMC;
- Falta de cursos de formação continuada na área de FMC;
- Formação inicial baseada no formalismo matemático;
- Despreparo do professor do EM para o planejamento de estratégias de ensino, em virtude do desconhecimento dos referenciais teóricos para a introdução de conteúdos de FMC;
- Descompasso entre as propostas de pesquisadores da área de Ensino em FMC e as reais intenções de docentes do Ensino Superior e do Ensino Médio.

Os estudos que apresentamos reforçam as suspeitas de que as dificuldades do professor em abordar a Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio sejam decorrentes de um fator principal: a deficiência em sua formação inicial. Entendemos que é essa deficiência que origina as diversas dificuldades com as quais o professor se depara ao atuar em sala de aula: i) implementar os PCNs; ii) reorientar sua prática didático-metodológica; iii) adequar os conteúdos de FMC para o Nível Médio; iv) planejar as estratégias de ensino-aprendizagem; v) elaborar e desenvolver em sala de aula atividades compatíveis com a carga horária mínima de duas horas-aula semanais; vi) despertar o interesse do aluno pela Física.

O levantamento apresentado neste capítulo nos orientou na construção da proposta metodológica para o ensino da radioatividade no Nível Médio. Procuramos elaborar as atividades de forma que possam contribuir para a superação dos obstáculos que dificultam a abordagem da FMC e com a efetiva inserção em sala de aula.

A RADIOATIVIDADE E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO NO NÍVEL MÉDIO

Conforme comentamos no capítulo 1º, há evidências de que a atualização do currículo de Física e a inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio ainda não correspondem às expectativas. Apesar das discussões nessa área virem se arrastando desde mais de duas décadas, pesquisas (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005; OLIVEIRA, VIANNA; GERBASSI, 2007; SIQUEIRA; PIETROCOLA; UETA, 2007) apontam que são escassos os estudos que apresentam propostas para a introdução dos conteúdos em sala de aula.

Sorpreso, Babichak e Almeida (2010) ressaltam que são diversas as justificativas para a introdução da FMC no Nível Médio, apontando certa unanimidade entre os pesquisadores quanto à sua necessidade, mas não há um consenso sobre *o quê* introduzir e de *como* fazê-lo. Siqueira, Pietrocola e Ueta (2007), ao comentarem o problema de *como* inserir os conteúdos, destacam a elaboração de atividades como um dos obstáculos à efetiva inserção dos conteúdos de FMC. A observação desses autores corrobora a investigação de Pereira e Ostermann (2009), a qual revela que são poucas as propostas didáticas testadas em sala de aula.

Ao levarmos em consideração as dificuldades que os professores encontram em inserir conteúdos de FMC no Nível Médio e a carência de propostas para sua inserção em sala de aula, decidimos elaborar uma proposta metodológica para o ensino de um tópico da Física desenvolvido a partir do século XX. A intenção foi desenvolver atividades que levem o aluno a identificar e compreender a Física presente no mundo real.

2.1. A ESCOLHA DO TEMA DE PESQUISA: O ENSINO DA RADIOATIVIDADE NO NÍVEL MÉDIO

A definição do objeto da presente pesquisa baseou-se em duas revisões bibliográficas, das quais a primeira foi realizada por Ostermann e Moreira (2000), e a segunda, por Pereira e Ostermann (2009); porém outro fator nos motivou a escolher o tema, cuja justificativa apresentamos mais adiante.

O levantamento de Ostermann e Moreira (2000) acerca de tópicos de FMC indicados para o Nível Médio nos levou a escolher o tema; já a pesquisa de Pereira e Ostermann (2009), ao apresentar a tendência dos temas de FMC abordados nos principais periódicos em ensino de Ciências no Brasil e no Exterior no período de 2001 a 2006, mostrou que há conteúdos que são pouco investigados pelos pesquisadores da área. Assim, com base nos dois levantamentos mencionados, decidimo-nos pela *radioatividade*, uma vez que este é um tema indicado para o currículo do Nível Médio (OSTERMANN; MOREIRA, 2000), mas ainda pouco abordado pelos pesquisadores da linha de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio (PEREIRA; OSTERMANN, 2009).

A motivação para a escolha do tema surgiu após o acidente radioativo ocorrido na usina de Fukushima, no Japão, provocado por um terremoto seguido de um *tsunami*, em 11 de março de 2011. O evento causou um grande impacto mundial e forte reação da sociedade, levantando questões sobre os riscos e benefícios da energia nuclear, a responsabilidade das autoridades e dos cientistas quanto à utilização e a continuidade ou não da exploração nuclear para geração de energia elétrica. Entre os estudantes do Ensino Médio o acidente despertou um grande interesse e levantou questionamentos sobre a produção de energia nuclear, o que é e como funciona um reator, o que é a radioatividade e quais os males que podem ser causados por materiais radioativos despejados pelos acidentes ou pelo uso incorreto de dispositivos nucleares.

Entendemos que as questões que dizem respeito à radioatividade devem ser debatidas entre os estudantes, com o intuito de formar cidadãos capazes de fazer opções e de tomar decisões, tanto nas questões que envolvem riscos para as pessoas ou para o meio ambiente, quanto naquelas que envolvem benefícios. Gil-Pérez e Vilches (2005) ressaltam que a educação científica e tecnológica tornou-se um fator positivo e essencial para a formação de todos os cidadãos, ganhando o estatuto de *slogan* a partir dos anos 90. “Converteu-se, na opinião de especialistas, numa exigência urgente, num factor essencial do desenvolvimento das pessoas e dos povos, *também a curto prazo*” (GIL-PÉREZ; VILCHES, 2005, p. 19).

Escolhido o tema, pensamos em uma proposta metodológica que efetivamente promovesse o ensino-aprendizagem da radioatividade no Nível Médio e que levasse em consideração as relações entre Ciência, tecnologia e suas implicações na sociedade. Decidimo-nos, então, pelo enfoque em Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS); porém, para que o estudante alcance uma atitude crítica em relação ao mundo à sua volta, consideramos importante a História e Filosofia da Ciência (HFC). Entendemos que a abordagem histórico-

filosófica propicia ao jovem um entendimento mais amplo da atividade científica e da natureza da Ciência, uma vez que permite reconstruir os episódios sociais e culturais que contribuíram para o desenvolvimento do objeto em estudo.

2.2. A ABORDAGEM HISTÓRICO-FILOSÓFICA NO ENSINO DE FÍSICA

Entre os pesquisadores da área de Ensino de Ciências, são muitos os argumentos a favor da introdução da História da Ciência, aliada à moderna Filosofia da Ciência no ensino em sala de aula (CARVALHO; SASSERON, 2010; MATTHEWS, 1995; PEDUZZI, 2004; SOLBES; TRAVER, 1996, 2001). Sobre a questão assim se pronuncia Peduzzi (2004, p. 3):

Uma das críticas mais contundentes ao ensino da física em qualquer nível de estudos, no que se refere à gênese das teorias e à elaboração do conhecimento, é a da disseminação da concepção empírico-indutivista da ciência. Esta e outras visões deformadas do conhecimento científico [...] estão amplamente presentes nos livros didáticos e em sala de aula. A história da física e as contribuições da moderna filosofia da ciência, articuladas ao ensino da física, podem reverter esse quadro, ensejando ao aluno uma melhor compreensão do produto e dos processos da ciência.

De acordo com Matthews (1995), um estudo publicado por Duschl em 1986 mostrou que o ensino de Ciências desenvolveu-se completamente dissociado da História, Filosofia e Sociologia da Ciência; porém, segundo o autor, a partir da década de 1990 iniciou-se uma ampla discussão em favor de uma abordagem contextualizada deste tema, tanto na formação de professores quanto no ensino, no sentido de buscar uma educação em que a Ciência seja ensinada em seus diversos contextos, como o ético, o social, o histórico, o filosófico e o tecnológico.

Matthews (1995) tece algumas considerações sobre a reaproximação entre o ensino e a História e Filosofia da Ciência como meio de superar a crise na educação científica. Segundo o autor,

A história, a filosofia e a sociologia da ciência não têm todas as respostas para essa crise, porém possuem algumas delas: podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e

reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral da matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do ‘mar de falta de significação’ que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; podem melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica, ou seja, de uma maior compreensão da estrutura das ciências bem como do espaço que ocupam no sistema intelectual das coisas (MATTHEWS, 1995, p. 165).

As discussões a favor do ensino com enfoque na História e Filosofia da Ciência (HFC) contribuíram para a inclusão dessa orientação nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) para o Ensino Médio. Segundo o documento,

A Física percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais [...]. O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o contexto social em que ocorreram. [...] Essa percepção do saber físico como construção humana constitui-se condição necessária, mesmo que não suficiente, para que se promova a consciência de uma responsabilidade social e ética (BRASIL, 1999, p. 235).

Para conhecer o papel desempenhado pela História e Filosofia da Ciência no ensino-aprendizagem de Física e de Química, Solbes e Traver (1996) realizaram uma investigação que resultou em uma análise crítica do ensino com respeito à falta de uma perspectiva histórica. Os autores verificaram, entre os alunos investigados, uma imagem deformada da atividade científica quando os aspectos históricos estão ausentes. Os pesquisadores constataram que os alunos acreditam que a Ciência consiste em descobrir uma realidade preexistente, ignoram o papel fundamental do trabalho científico e assumem uma visão empirista, basicamente formalista e acumulativa da Ciência e de sua evolução.

O enfoque da História e Filosofia da Ciência no ensino de Física, segundo pesquisadores da área, permite mostrar ao jovem que a Ciência é uma construção humana, caracterizada por leis, teorias e princípios elaborados pelo homem ao interpretar os fenômenos naturais; possibilita reconhecer o caráter do trabalho coletivo de cientistas, do intercâmbio e do debate crítico de ideias e expõe os erros e os acertos, o conflito de opiniões e as dificuldades encontradas pelos cientistas ao longo do caminho trilhado na busca do

conhecimento científico, em vários momentos da história. Também mostra o contexto sócio-histórico-cultural em que surgiram as ideias, possibilitando conhecer as raízes históricas de determinados conceitos; dá condições ao educando de compreender que a construção do conhecimento científico é guiada por paradigmas², isto é, por modelos ou padrões aceitos pela comunidade científica que influenciam a observação e interpretação dos fatos, e permite discutir sobre os momentos de crise que produziram as revoluções científicas e transformaram o pensamento científico, ao substituir dogmas consagrados por novas ideias. Entende-se que a História e Filosofia da Ciência propicia ao estudante uma visão contextualizada da Ciência e o seu aspecto não linear, contrapondo-se à ideia de Ciência pronta, imutável e acabada. “A filosofia da ciência ilumina a história da ciência. Sem ela, esta história é acrítica, enciclopédica, dogmática, linear, sem tropeços, sem idas e vindas, ‘racionalmente racional’” (PEDUZZI, 2004, p. 7).

Carvalho e Sasseron (2010) consideram que a evolução histórica do conhecimento deve ser levada em conta no planejamento das atividades de ensino. Segundo as autoras, as abordagens de ensino com ênfase na História e Filosofia da Ciência devem ser encaradas como uma forma a mais de trabalhar um conceito em sala de aula. As pesquisadoras propõem o ensino por investigação, com o uso de textos que contemplem a evolução histórica do conhecimento científico, com o intuito de promover o envolvimento dos alunos nas discussões sobre o que é Ciência e como o conhecimento humano é construído. Não obstante, ressaltam ser necessário que as atividades estejam inseridas em sequências de ensino que permitam trabalhar os conteúdos conceituais, procedimentais e atitudinais. As autoras defendem também o uso de outras atividades - como as demonstrativas, o laboratório investigativo e a resolução de problemas abertos.

Solbes e Traver (2001) propõem a elaboração de materiais que incorporem diversos aspectos histórico-filosóficos, como, por exemplo, biografias contextualizadas que mostrem o lado mais humano do trabalho científico, textos originais que apresentem as controvérsias e a evolução de determinados conceitos. Os autores trabalharam com dois grupos de estudantes, com o intuito de verificar se é possível modificar a imagem que o jovem tem da Ciência aplicando atividades que levem em conta os aspectos histórico-filosóficos, mediante metodologias mais ativas. No trabalho com o grupo chamado de *experimental* os autores aplicaram a metodologia com abordagem histórico-filosófica, enquanto no outro grupo o

² O termo paradigma foi definido por Thomas S. Kuhn na obra intitulada *A Estrutura das Revoluções Científicas*. Segundo o autor, “[...] ‘paradigmas’ são realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções modelares para uma comunidade científica” (KUHN, 2003, p. 13).

trabalho foi marcado pela ausência dessa perspectiva. De acordo com os pesquisadores, a introdução da História e Filosofia das Ciências nas aulas com o primeiro grupo produziu uma atitude positiva do aluno em relação ao conhecimento científico, o que fez melhorar o ambiente em sala de aula e o interesse do jovem em participar mais ativamente do processo ensino-aprendizagem. Os estudantes também demonstraram uma imagem mais contextualizada da Ciência e mais próxima da realidade.

O tema central de nossa pesquisa é o ensino da radioatividade no Nível Médio. Diante dos argumentos apresentados, entendemos que o debate e os questionamentos envolvendo os eventos que levaram à detecção da radioatividade e a compreensão de sua natureza contribuirão para que o aluno tenha uma visão contextualizada do fenômeno. Desse modo, consideramos o enfoque histórico-filosófico essencial para dar significado ao estudo da radioatividade. Dois aspectos importantes são abordados: a detecção da radioatividade natural e as pesquisas iniciais para a compreensão do fenômeno.

2.3. O ENFOQUE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE (CTS) NO ENSINO DE FÍSICA

Não há dúvida de que a ciência e tecnologia têm grande impacto no desenvolvimento econômico e social do planeta. Por outro lado, a ciência e as aplicações tecnológicas muitas vezes têm interferido no meio ambiente sem se levar em conta os efeitos e as consequências negativas para a sociedade. Todos os dias surgem novas descobertas ou temas que despertam calorosas discussões entre cidadãos e especialistas.

Questões como as aplicações da Física Nuclear na medicina e no cotidiano, os acidentes em usinas nucleares, a destinação dos resíduos radioativos produzidos, o uso de fontes de energia renovável, as expectativas relativas aos experimentos com o LHC³, as mudanças climáticas no planeta, são alguns exemplos de temas que suscitam debates na sociedade. Problemas como estes, que chamam a atenção e envolvem cidadãos nas discussões, fizeram emergir, na década de 1960, o movimento denominado CTS - Ciência, Tecnologia e Sociedade -, resultante da ação de cidadãos preocupados com o bem-estar do homem e a preservação do meio ambiente.

³LHC: Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadrons Collider*). Inaugurado em 2008 pelo CERN - Centro Europeu de Pesquisas Nucleares -, o LHC é o maior acelerador de partículas do mundo. O objetivo do LHC é provocar colisões de hádrons, como prótons, para que se possa produzir o aparecimento de novas partículas e ampliar o conhecimento que se tem atualmente da Física de partículas (BALTHAZAR; OLIVEIRA, 2010).

Alguns fatores contribuíram para o surgimento do movimento. Em meados do século XX, o desenvolvimento científico e tecnológico vinculado à degradação ambiental e à guerra, como a produção da bomba atômica, de armas químicas e biológicas como o *agente laranja* e o *napalm* utilizados na guerra do Vietnã (AULER; DELIZOICOV, 2002; LINSINGEN, 2004), a preocupação com o poder destrutivo e o armazenamento crescente de armas nucleares por diversos países e o uso indiscriminado de pesticidas são alguns exemplos de fatores que provocaram muitas críticas e debates na sociedade.

Por outro lado, um fato notável deflagrou o movimento CTS nos Estados Unidos da América. Segundo Gil-Pérez e Vilches (2005), os fertilizantes químicos e pesticidas utilizados após a Segunda Guerra Mundial produziram um expressivo aumento da produção agrícola, em um momento de crescimento significativo da população mundial; contudo, alguns anos depois a Comissão Mundial do Meio Ambiente lançou o alerta sobre o uso indiscriminado desses produtos agrícolas. Constatou-se que o excesso de agentes químicos causava sérios problemas à saúde humana, como malformações congênitas e até câncer, além de envenenar aves, mamíferos e peixes.

A denúncia do envenenamento da água e do solo já havia sido feita no final dos anos 1950 pela bióloga naturalista Rachel Carson, no livro intitulado “Primavera Silenciosa” (GIL-PÉREZ; VILCHES, 2005). A autora apresenta estudos incontestáveis dos efeitos nocivos do DDT – diclorodifeniltricloreto⁴, que contribuiu para a extinção de pássaros como o falcão-peregrino e a águia-careca. De acordo com Gil-Pérez e Vilches, a obra provocou um grande impacto na sociedade e críticas violentas da indústria química, de políticos e até de cientistas, que a acusaram de se posicionar contra o progresso que permitia alimentar a crescente população mundial. Alguns anos depois da publicação de Carson, reconheceu-se que o DDT era realmente nocivo e, em 1972, após uma acirrada batalha judicial e política, o produto foi banido dos Estados Unidos da América e em seguida também em outros países industrializados. Infelizmente, o pesticida continuou a ser utilizado em países em desenvolvimento. No Brasil, o produto foi proibido somente em 1985 (AMBIENTE BRASIL, c2011).

A luta de Rachel Carson contra o DDT chamou a atenção de grupos de cidadãos e os argumentos a favor da proteção do meio ambiente se intensificaram. A bióloga é recordada

⁴O DDT era um pesticida muito popular. Foi largamente usado para proteger soldados contra insetos durante a Segunda Guerra Mundial, para combater pragas na lavoura e também o mosquito *Anopheles*, transmissor do parasita da malária. Tem efeito prolongado, se espalha facilmente pelo ar, rios e solo, atingindo tanto as pragas quanto a fauna e a flora da área afetada. No ser humano acumula-se na glândula tireoide, nos rins e no fígado, além de outros problemas (AMBIENTE BRASIL, c2011).

como a “mãe do movimento ecologista”, cuja influência significativa entre os grupos ativistas originou o movimento CTS (GIL-PÉREZ; VILCHES, 2005).

A partir dos anos 70, o movimento, que originalmente surgiu da militância de cidadãos preocupados com as consequências sociais e ambientais de produtos tecnológicos, estendeu-se ao campo da educação (AULER; DELIZOICOV, 2002). Somando-se aos problemas ambientais que suscitaram o movimento, Santos e Mortimer (2002) relatam que a preocupação com a qualidade de vida da sociedade industrializada, a necessidade de participação dos cidadãos nas decisões públicas, que até então se encontravam sob o controle de políticos e especialistas, o receio e as frustrações decorrentes dos excessos tecnológicos, contribuíram para o surgimento do enfoque CTS no ensino de Ciências. Segundo os autores, a tendência CTS foi incorporada inicialmente nos currículos escolares de países industrializados da Europa, nos Estados Unidos da América (EUA), no Canadá e na Austrália, em decorrência da necessidade premente de uma educação científica e tecnológica.

Na Espanha, de acordo com Furió et al. (2001), a nova orientação para o ensino de Ciências levou à reformulação dos currículos escolares das escolas de grau médio a partir da década de 1980. Até então, os currículos centravam-se quase exclusivamente na aquisição de conhecimentos científicos, com o intuito de familiarizar os estudantes com as teorias, leis e conceitos físicos. Segundo os autores, de lá para cá novos componentes passaram a ser incluídos nos currículos no sentido de orientar o ensino de Ciências, levando-se em consideração os aspectos sociais e pessoais dos estudantes.

As relações entre ciência, tecnologia e sociedade e a ênfase na alfabetização científica e tecnológica como parte essencial na formação de todos os cidadãos, passaram a fazer parte das tendências do ensino em todo o mundo. No Brasil, constata-se que o enfoque CTS emerge na década de 1990 (SASSERON, 2010). Até então a orientação do ensino de Ciências era bastante tradicional, limitando-se à transmissão de conteúdos através de aulas quase sempre expositivas e ao uso do livro didático como único recurso em sala de aula. A ênfase das atividades ministradas pelo professor recaía na resolução excessiva de exercícios memorísticos e algébricos, desvinculados da realidade do aluno.

As discussões envolvendo as relações entre ciência, tecnologia e sociedade no contexto escolar influíram na reformulação do currículo escolar brasileiro. Podemos constatar o enfoque CTS no texto dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) para o Ensino Médio, publicado em 1998, ao se referir às competências que devem ser desenvolvidas no ensino de Física. Afirma o documento:

[...] devem ser promovidas as competências necessárias para a avaliação da veracidade de informações ou para a emissão de opiniões e juízos de valor em relação a situações sociais nas quais os aspectos físicos sejam relevantes. Como exemplos, podemos lembrar a necessidade de se avaliar as relações de riscos/benefícios de uma dada técnica de diagnóstico médico, as implicações de um acidente envolvendo radiações ionizantes, as opções para o uso de diferentes formas de energia, as escolhas de procedimentos que envolvam menor impacto ambiental sobre o efeito estufa ou a camada de ozônio, assim como a discussão sobre a participação de físicos na fabricação de bombas atômicas (BRASIL, 1999, p. 235).

Nesse sentido, o ensino de Física com enfoque CTS deixa de ser a mera aquisição de conhecimentos científicos, leis e teorias e passa a ter como objetivo central a preparação do aluno para o exercício da cidadania, caracterizando-se pela abordagem das relações entre ciência e tecnologia no seu contexto social. Nessa perspectiva, espera-se formar um cidadão com responsabilidades sociais e éticas, atento aos problemas da vida moderna e capaz de emitir juízos de valor e de fazer opções com relação às questões que envolvem o desenvolvimento científico e tecnológico, o bem-estar do homem e a preservação do meio ambiente (AULER; DELIZOICOV, 2002; FURIÓ et al., 2001; GIL-PÉREZ; VILCHES, 2005; SANTOS; MORTIMER, 2002). A efetiva participação dos cidadãos na tomada de decisões “é hoje um facto positivo, uma garantia de aplicação do princípio da precaução, que se apoia numa crescente sensibilidade social face às implicações do desenvolvimento tecnocientífico que pode comportar riscos para as pessoas ou para o meio ambiente” (GIL-PÉREZ; VILCHES, 2005, p. 29).

Os PCNs e os PCNs+ apontam para o ensino de Física com enfoque no movimento CTS, no sentido de formar cidadãos críticos e participativos da sociedade contemporânea. Todavia, constatamos que o documento das Diretrizes Curriculares da Educação Básica do Paraná (SEED, 2008) não faz qualquer referência a tal perspectiva de ensino.

Aikenhead (1994) estabeleceu uma classificação das propostas de ensino denominadas CTS, de acordo com o grau de importância atribuído aos conteúdos com enfoque CTS em relação aos de Ciência pura. O pesquisador estabeleceu oito categorias em escala crescente: quanto mais se avança nas categorias, maior é o grau de importância conferido ao ensino CTS. As categorias são as seguintes (AIKENHEAD, 1994):

- *Categoria 1: Motivação por conteúdo CTS*

O ensino de Ciências é tradicional. Faz-se apenas uma menção ao conteúdo CTS para tornar as aulas mais interessantes. O baixo status explica porque essa categoria não é normalmente levada a sério na instrução CTS. Os alunos não são avaliados quanto aos conteúdos CTS.

- *Categoria 2: Introdução casual de conteúdos CTS*

O ensino de Ciências é tradicional, acrescido de breves abordagens de conteúdos CTS (por exemplo, apêndices incorporados a tópicos de Ciências). Os alunos são avaliados principalmente no que diz respeito aos conteúdos de Ciência pura e superficialmente com relação aos CTS (por exemplo, 5% CTS e 95% Ciência pura).

- *Categoria 3: Introdução intencional de conteúdos CTS*

O ensino de Ciências é tradicional, acrescido de uma série de breves conteúdos CTS integrados aos tópicos de Ciência, a fim de abordar sistematicamente os conteúdos CTS. Os conteúdos formam temas unificadores. A compreensão dos estudantes sobre conteúdos CTS é avaliada superficialmente (por exemplo, 10% CTS e 90% Ciência pura).

- *Categoria 4: Disciplina específica por meio de conteúdos CTS*

O conteúdo CTS tem o papel de organizar os conteúdos de Ciência e a sua sequência. O conteúdo científico é selecionado a partir de uma disciplina. A lista de tópicos de Ciência pura é semelhante à da categoria 3, ainda que a sequência possa ser bem diferente. Os estudantes são avaliados pela compreensão com relação aos conteúdos CTS, mas não tão amplamente quanto na Ciência pura (por exemplo, 20% CTS e 80% Ciência pura).

- *Categoria 5: Ciência por meio de conteúdos CTS*

O conteúdo CTS organiza o conteúdo de Ciência e a sua sequência. O conteúdo de Ciência é multidisciplinar, ditado pelo conteúdo de Ciência. A listagem de tópicos científicos puros se assemelha à seleção de importantes tópicos, a partir de uma variedade de cursos de ensino tradicional de Ciências. Os alunos são avaliados pela compreensão em CTS, mas ainda não tão amplamente quanto na Ciência pura (por exemplo, 30% CTS e 70% Ciência pura).

- *Categoria 6: Ciência junto com conteúdos CTS*

O conteúdo CTS é o foco do ensino. O conteúdo científico é relevante e enriquece a aprendizagem. A avaliação dos estudantes quanto à compreensão CTS e de Ciência pura tem o mesmo peso.

- *Categoria 7: Incorporação das Ciências ao conteúdo CTS*

O conteúdo CTS é o foco do ensino. O conteúdo relevante de Ciência é mencionado, mas não é sistematicamente ensinado. Pode ser dada a ênfase apenas aos princípios gerais da Ciência. Os estudantes são avaliados prioritariamente em CTS e apenas parcialmente em conteúdos de Ciência pura (por exemplo, 80% CTS e 20% Ciência pura).

- *Categoria 8: Conteúdos de CTS*

A tecnologia e o debate social são o foco do ensino. Conteúdos de Ciência são abordados, mas apenas para mostrar uma ligação com a Ciência. Os alunos são avaliados unicamente pela compreensão dos conteúdos CTS.

Além da categoria, é necessário adotar uma metodologia para desenvolver as atividades que serão propostas. Santos e Mortimer (2002) explicam que são diversas as estratégias de ensino recomendadas na perspectiva CTS que contribuem para que os alunos desenvolvam habilidades e atitudes necessárias a tomadas de decisão. Segundo os autores, as estratégias de ensino para uma abordagem CTS mais efetiva indicam que os materiais didáticos sejam organizados de acordo com os seguintes passos: i) introdução de um problema social; ii) análise da tecnologia relacionada ao tema social; iii) estudo do conteúdo científico definido em função do tema social e da tecnologia introduzida; iv) estudo da tecnologia correlata em função do conteúdo apresentado; v) discussão da questão social original. Nessa perspectiva, o estudo em torno de um tema permite ao professor introduzir um problema social a ser discutido com os estudantes. Após o debate em sala de aula, é possível propor as soluções para o problema com base nos conteúdos científicos, em suas aplicações tecnológicas e nas repercussões sociais.

De acordo com as orientações descritas, consideramos importante o professor gerenciar debates com os estudantes envolvendo problemas sociais como os riscos e benefícios da utilização da energia nuclear e as consequências para o ser humano e o meio ambiente. Questões como os acidentes ocorridos em usinas nucleares, aplicações da radioatividade na medicina e na indústria, os efeitos biológicos no ser humano, são exemplos de problemas sociais que merecem ser discutidos em sala de aula.

RADIOATIVIDADE: UM BREVE HISTÓRICO

3.1. O TUBO DE CROOKES E OS RAIOS X

A detecção dos raios X é considerada a pedra fundamental do caminho que leva a Física Clássica à Física Moderna. A histórica observação do fenômeno, na virada do século XIX para o século XX, é um capítulo fascinante no desenvolvimento da Física experimental (FUCHS, 1972) e começa com os estudos dos raios catódicos.

Os experimentos realizados em 1752, com uma pipa, pelo físico e estadista norte-americano Benjamin Franklin durante uma tempestade de raios, permitiram que cientistas deduzissem que a eletricidade não se restringia a sólidos e líquidos, mas também podia ser transmitida através de gases. Esses experimentos inspiraram outros cientistas a pesquisar a condução de eletricidade em diversos gases. Para isso, utilizaram uma ampola de vidro lacrada contendo um gás, com eletrodos nas duas extremidades. A corrente elétrica era detectada quando uma diferença de potencial era aplicada entre os eletrodos metálicos; porém, os pesquisadores observaram que, mesmo com um gás rarefeito no interior da ampola, o amperímetro indicava a passagem de corrente elétrica.

Em meados do século XIX, muitos cientistas prosseguiram os estudos com descargas elétricas em tubos contendo gases rarefeitos. Havia certa dificuldade técnica na realização de vácuo no interior do tubo, mas com o aperfeiçoamento das bombas de vácuo, as pesquisas adquiriram um novo estímulo. Segundo Martins (2012), o físico alemão Julius Plücker observou certa luminescência no interior do tubo de descarga quando utilizava gases com pressões menores. Em 1869, Johann Wilhelm Hittorf notou que “algo” saía do eletrodo negativo e se propagava em linha reta até a parede oposta da ampola. O pesquisador também observou que esse “algo” podia ser interceptado por corpos sólidos, sendo o efeito semelhante à produção de sombras. Hittorf chamou o fenômeno de “raios de brilho”. Tais experimentos despertaram o interesse do químico e físico inglês William Crookes (1832-1919).

Na década de 1870, Crookes construiu um tubo de vidro contendo gás de pressão muito baixa, que ficou conhecido como “ampola de Crookes”. O tubo era constituído por dois eletrodos metálicos dispostos em suas extremidades, aos quais se aplicava uma alta diferença de potencial (ddp). Quando os raios que emergiam do terminal negativo incidiam no eletrodo positivo, feito de folha de alumínio em forma de cruz (cruz de Malta), obtinha-se uma sombra

bem-definida sobre a parede de vidro atrás do ânodo. Crookes percebeu que a parede de vidro onde os raios incidiam tornava-se luminescente, com um brilho amarelo-esverdeado, mas não conseguiu explicar tal luminescência. Em 1876, o físico alemão Eugen Goldstein introduziu o termo “raios catódicos” para denominar os raios detectados nos tubos de descarga elétrica. Mais tarde, soube-se que os raios catódicos⁵ eram elétrons que partiam do eletrodo negativo (cátodo) e se propagavam em linha reta para o eletrodo positivo (ânodo).

Vários cientistas dedicaram-se às pesquisas para entender a natureza dos raios catódicos, entre eles, Heinrich Hertz e seu assistente Philipp Lenard. Lenard modificou o tubo de Crookes, colocando uma janela de alumínio por onde os raios catódicos podiam escapar para o exterior. Defronte à janela, posicionou um anteparo fluorescente para observar a interação entre os raios e a tela e verificou que até à distância de oito centímetros ele detectava luminescência visível no ar; observou também que corpos luminescentes se tornavam luminosos e chapas fotográficas ficavam sensibilizadas, em virtude dos raios catódicos. (MARTINS, 2012; OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Em 1894, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), físico experimental alemão, interessou-se pelos raios catódicos e pelos experimentos de Hertz e Lenard. Röntgen adquiriu os materiais necessários para os experimentos, mas teve de interromper os trabalhos porque fora eleito reitor da Universidade de Würzburg. No final de outubro de 1895, retomou os estudos com os tubos de descarga e indutância, dedicando-se aos experimentos com grande entusiasmo. A indutância era utilizada para a produção de voltagens de vários milhares de volts, necessárias para os tubos de descarga (FUCHS, 1972). Fuchs conta que Röntgen era um homem reservado; durante suas investigações, nenhum de seus amigos, nem mesmo seus assistentes ou estudantes conheciam que tipos de observações ele vinha fazendo. Suas refeições eram servidas na sala de trabalho e as pesquisas prosseguiram até tarde da noite. Röntgen repetiu o experimento de Lenard, embrulhando o tubo com papel preto para que a luminescência no vidro não atrapalhasse a visão no anteparo fluorescente. Apagou a luz do laboratório e foi afastando o anteparo fluorescente até dois metros de distância do tubo, e observou que a luminescência persistia. Ligou e desligou o tubo várias vezes, e a cada vez que desligava, a luminescência desaparecia. Suas observações o levaram a concluir que os raios que emanavam do tubo não eram os raios catódicos, mas um tipo diferente de raio. Esses

⁵ Em 1897, o físico inglês Joseph John Thomson concluiu, por meio de dados experimentais, que os raios catódicos eram partículas menores e mais leves do que os átomos. Thomson confirmou que tal radiação era constituída por partículas com carga elétrica negativa, as quais foram chamadas de elétrons, e mostrou que o átomo não era indivisível.

novos raios eram mais penetrantes e não sofriam desvios com a ação de campos elétricos ou magnéticos.

Segundo Okuno e Yoshimura (2010), Röntgen realizou experimentos colocando diversos materiais entre o tubo e o anteparo. Observou que os raios emitidos tinham grande capacidade de atravessar coisas, como livros, madeira, placas metálicas com diferentes espessuras e até certos líquidos. Ao colocar um material diante do tubo, percebeu, atônito, o contorno dos ossos de seu dedo na tela fluorescente. No dia 22 de dezembro de 1895, Röntgen radiografou a mão esquerda de sua esposa, Anna Bertha, que permanecera estática durante 15 minutos de exposição. Foi a primeira radiografia de um membro do corpo humano em vida, inclusive, mostrando claramente a aliança que usava em sua mão. A famosa radiografia (raios X) encontra-se exposta no *Deutsches Museum*, na Alemanha.

Röntgen batizou o novo fenômeno de raios X por questão de brevidade e por não saber do que se tratava. Em 28 de dezembro de 1895, publicou, nos anais da Associação de Física e Medicina de Würzburg, o artigo intitulado *On a new kind of rays*, em que apresentava os resultados de suas pesquisas⁶. A notícia da fantástica descoberta foi publicada na primeira página de um jornal de Viena, em 5 de janeiro de 1896, e correu rapidamente o mundo.

Durante sua vida, Röntgen publicou quase 60 trabalhos e, entre estes, apenas três artigos curtos foram dedicados aos raios X. Seus experimentos foram discutidos, repetidos e confirmados e, em pouco tempo, tornou-se uma pessoa famosa. Em 1901, recebeu o Prêmio Nobel de Física, pelo feito realizado. (MARTINS, 2012).

Aparentemente, vários cientistas já haviam observado a fluorescência de materiais colocados próximos aos tubos de descarga, porém, nenhum deles conseguiu perceber que os raios X eram diferentes dos raios catódicos. Lenard foi um desses pesquisadores e, talvez, a não-constatação deveu-se à sua falta de tempo ou de equipamentos adequados para a investigação. Isso fez com que Lenard ficasse profundamente enciumado da fama de Röntgen, pois acreditava que no prazo de um ano chegaria aos resultados do colega.

Ele [Lenard] nunca utilizou o nome de Röntgen ao se referir aos raios. Considerou como uma afronta pessoal qualquer reconhecimento inadequado de seu trabalho e era incapaz de alguma generosidade, ou mesmo justiça, com relação a qualquer um que, em sua opinião, tivesse falhado em apreciar

⁶ Segundo Martins (2012), Röntgen não informou exatamente como ocorreu a detecção dos raios X. Uma entrevista concedida por ele ao jornalista norte-americano Henry Dam, em janeiro de 1896, é uma das poucas fontes de informação que se tem a esse respeito. Grande parte de seus manuscritos foi queimada após sua morte, a pedido do próprio cientista.

qualquer aspecto de seus serviços à ciência (ANDRADE⁷, 1947, apud MARTINS, 2012, p. 35).

Conforme relata Martins (2012), a divulgação do trabalho de Röntgen despertou diferentes sentimentos: reconhecimento, por uma parte dos cientistas, ciúmes e alegações de que a descoberta já havia sido realizada, por outra parte dos pesquisadores, além de grande estardalhaço da imprensa leiga, com deturpação da descoberta. Toda essa agitação acabou prejudicando Röntgen em prosseguir com novas pesquisas.

3.2. RADIOATIVIDADE: DA DETECÇÃO DO FENÔMENO À COMPREENSÃO DE SUA NATUREZA

A detecção da radioatividade é atribuída a Antoine Henri Becquerel (1852-1908), físico francês, descendente de uma ilustre família de cientistas. Há indícios, todavia, de que o pesquisador não reconheceu que o efeito que havia observado em seus experimentos tratava-se, na verdade, de um fenômeno ainda desconhecido. Segundo Martins (1998), no período de 1882 a 1897, Becquerel desenvolveu pesquisas sobre óptica e fosforescência. Entre seus estudos, estão a fosforescência invisível de várias substâncias (infravermelho) e os espectros de fluorescência de sais de urânio.

A pesquisa dos raios X por Röntgen, em 1895, levou um grande número de cientistas a apresentar estudos relacionados ao fenômeno. Na época, já eram conhecidos muitos tipos de ondas eletromagnéticas, como os raios ultravioleta (UV), luz visível, infravermelho (IV) e ondas de rádio. Sabia-se que existiam semelhanças muito grandes entre os raios X e os raios ultravioleta. Ambos eram invisíveis e não afetavam a retina, apesar de produzirem efeitos fotográficos e fluorescência. Em virtude dessas semelhanças, pensou-se que os raios X poderiam ser um novo tipo de onda eletromagnética de alta frequência⁸.

Em 1896, após tomar conhecimento da descoberta de Röntgen, Becquerel passou a investigar compostos de urânio que se tornavam fluorescentes após receberem luz solar; contudo, o trabalho de Becquerel foi motivado inicialmente pela hipótese de Henri Poincaré

⁷ ANDRADE, E. N. C.. Obituary. Prof. P. Lenard. *Nature* 160: 895-6, 1947.

⁸ Somente em 1912 é que a natureza dos raios X foi plenamente estabelecida por Max von Laue (1879-1960), como sendo uma onda eletromagnética de comprimento de onda muito menor do que o da luz visível; porém, foi em 1920, com a teoria da dualidade onda-partícula, que ficou estabelecido que a luz e os raios X apresentavam comportamento dual, sendo o fóton (“partícula de luz”) a partícula associada à onda eletromagnética (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

de que havia uma relação entre a emissão dos raios X e a fluorescência do vidro, matéria de que era feito o tubo de raios X. Poincaré levantou tal hipótese com base nos experimentos com o tubo de Crookes. Ao ser este atravessado por uma descarga elétrica e emitir radiação X, a parede de vidro defronte ao cátodo torna-se luminescente.

O trabalho de Charles Henry, que afirmava ter conseguido produzir efeitos iguais aos de uma radiografia ao utilizar sulfeto de zinco fosforescente, parecia confirmar a hipótese de Poincaré. Os estudos de Gaston H. Niewenglowski com outro material fosforescente (sulfeto de cálcio) também pareciam concordar com os resultados de Charles Henry de que os materiais fosforescentes, além de emitirem luz visível, emitiam raios X invisíveis, quando excitados pela luz solar.

A hipótese (falsa) de Becquerel era a mesma de seus colegas, ou seja, a de que os compostos de urânio também emitiam raios X, por isso ocasionavam forte fluorescência ao atingirem certas substâncias. Para comprovar sua ideia, Becquerel colocou uma amostra de uma substância luminescente - o sulfato duplo de urânio e potássio - sobre uma placa fotográfica envolta em duas folhas de papel negro muito espesso e a expôs à luz solar no peitoril da janela por várias horas. As primeiras experimentações sugeriam que o material emitia raios X, pois a silhueta da amostra aparecia na placa revelada; contudo, em um período de tempo nublado, ao guardar, durante sete dias, uma amostra em uma gaveta em que não penetrava luz, observou que a chapa fotográfica também ficara impressionada. Não obstante, segundo Martins (1998), Becquerel não reconheceu nada de novo nessas observações, e assim, continuou a basear suas explicações em fenômenos conhecidos. Examinou outros materiais fosforescentes, realizando experimentos na obscuridade e com variações nos procedimentos. Notou que a radiação penetrante ocorria tanto quando o material fosforescente era colocado na escuridão, quanto na presença da luz solar.

Há resultados descritos por Becquerel que não podem ser compreendidos, o que o leva a conjecturar que “ou existiram efeitos que não podem ser explicados por nossos conhecimentos, ou Becquerel se enganou em suas observações – e, nesse caso, pode ter sido induzido por suas expectativas teóricas a ver fenômenos inexistentes” (MARTINS, 1998, p. 38). Por fim, após observar todos os compostos de urânio luminescentes e não luminescentes, Becquerel testou o urânio metálico e verificou que este também emitia radiação invisível. De acordo com o autor, o resultado observado deveria ter levado Becquerel a pensar que se tratava de algo novo, de um fenômeno de outra natureza, mas o cientista concluiu que se tratava de um metal que apresentava fosforescência invisível. Após um período de menos de

três meses, Becquerel parece ter se desinteressado do assunto e abandonou suas pesquisas acerca dos *raios de urânio*. Até o início de 1898, o único resultado novo foi o de que a radiação do urânio permanecia forte ao longo dos meses.

Outros cientistas, entretanto, começaram a investigar o fenômeno. O casal Marie Curie e Pierre Curie foi quem deu as primeiras contribuições ao estudo da radioatividade. Marie Sklodowska Curie (1867-1934) nasceu em Varsóvia, Polônia, que fazia parte da então União Soviética. Segundo Hewitt (2011), Marie estudou em escolas locais e recebeu alguma educação em prática científica por parte de seu pai, que era professor de escola secundária. Mudou-se para Paris em 1891 para juntar-se à sua irmã mais velha, que era física, e prosseguir seus estudos na Sorbonne. Após terminar a graduação, conheceu o famoso físico Pierre Curie, com quem se casou em 1895, e passou a ser conhecida como Madame Curie. O casal logo começou a trabalhar junto.

Marie, entusiasmada com o fenômeno observado por Becquerel, em 1897, resolveu escrever sua tese de doutorado sobre o tema (FUCHS, 1972). Na época, já uma cidadã francesa, estudou vários minerais e substâncias químicas puras. Seus primeiros estudos experimentais com os *raios de urânio* indicavam tratar-se de um fenômeno de natureza diferente da fosforescência. Tal conclusão se distanciava definitivamente de Becquerel, iniciando um novo período na investigação das radiações. Foi ela quem cunhou o termo *radioatividade*:

Os raios urânicos foram frequentemente chamados de raios de Becquerel. Pode-se generalizar esse nome, aplicando-o não apenas aos raios urânicos, mas também aos raios tóricos e a todas as radiações semelhantes.

Chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel. O nome hiperfosforescência que foi proposto para o fenômeno, parece-me dar uma falsa ideia de sua natureza (CURIE⁹, 1899, apud MARTINS, 1998, p. 43, grifo do autor).

Ao examinar um composto de urânio, a pitchblenda (ou uraninita), Marie Curie notou que o mineral emitia uma radiação mais intensa do que o urânio metálico puro. Tal fato lhe pareceu estranho, pois o que se esperava era que a pitchblenda apresentasse atividade inferior à do próprio urânio puro. Essas pesquisas levaram Marie Curie a examinar o tório, contido em pequena quantidade na pitchblenda, e ela observou que este elemento também emitia radiação

⁹ CURIE, M. S.. Les rayons de Becquerel et le polonium. *Révue Générale des Sciences*, 10, p. 41-50, 1899.

ionizante, além do urânio. Por outro lado, Gerhardt Carl Schmidt, na Alemanha, havia publicado a mesma descoberta algumas semanas antes. A descoberta da emissão da radiação pelo tório permitiu concluir que o fenômeno não era específico do urânio, mas algo mais geral.

Marie Curie examinou também a calcolita, um mineral que contém principalmente fosfato de urânio e de cobre. Observou que a amostra apresentava uma atividade muito superior à do urânio e do tório puros. Os resultados experimentais obtidos com a pitchblenda e a calcolita levaram Curie a pensar que esses minerais continham um elemento muito mais ativo do que o próprio urânio, então ela passou a especular a causa do fenômeno.

Em 1898, Marie Curie e seu marido, Pierre Curie, empenharam-se no trabalho de isolar a substância que suspeitavam estar contida na pitchblenda. Conseguiram separar finos traços de um elemento 400 vezes mais radioativo do que o urânio, ao qual chamaram de *polônio*, em homenagem à Polônia, país natal de Marie Curie. Juntamente com Gustave Bémont, o casal Curie apresentou à Academia de Ciências de Paris outro elemento 900 vezes mais ativo do que o urânio, ao qual chamaram de *rádio*, porque parecia ser mais radioativo do que qualquer outro elemento. (FUCHS, 1972).

Em 1903, Marie e Pierre Curie dividiram, juntamente com Henri Becquerel, o Prêmio Nobel de Física pelos trabalhos com a radioatividade. De acordo com Hewitt (2011), há fontes que asseguram que o casal Curie dividiu parte do dinheiro do Prêmio com pessoas conhecidas que passavam necessidade, e com estudantes. A Sorbonne de Paris nomeou Pierre para o cargo de professor e concedeu-lhe um laboratório para pesquisas, do qual Marie tornou-se diretora. Três anos depois, em uma tarde chuvosa de 1906, Pierre Curie foi atropelado por uma carroça ao atravessar uma rua, vindo a falecer em virtude de diversas fraturas. O departamento de Física da Sorbonne confiou a Marie o cargo de professor, ocupado antes por Pierre, e ela tornou-se a primeira mulher a lecionar naquela Universidade, onde prosseguiu com suas pesquisas.

Segundo Okuno e Yoshimura (2010), quatro anos após a morte de seu marido, Marie Curie teve um *affair* com o físico Paul Langevin, que era casado e havia sido grande amigo de Pierre Curie. No início de novembro de 1911, o romance tornou-se público logo após o anúncio de que ela havia ganhado o segundo Prêmio Nobel, desta vez de Química, pela descoberta dos elementos químicos - polônio e rádio. O escândalo repercutiu de tal forma que um membro da Academia de Ciências da Suécia a aconselhou a não comparecer à festa de premiação. Em dezembro daquele ano, entretanto, Mme. Curie compareceu à entrega do

Nobel e, no discurso, enalteceu o trabalho de seu marido, dizendo que o Prêmio era também um tributo a ele. Dias após a festa de premiação, caiu em profunda depressão, mas superou os problemas com o apoio da física Hertha Ayrton, que a acolheu em sua residência, na Inglaterra, durante um ano.

Marie teve duas filhas do casamento com Pierre Curie. Irène Curie, a primeira filha, tornou-se uma física nuclear famosa e ganhou, juntamente com o seu marido Frédéric Joliot-Curie, o Prêmio Nobel de Química em 1935. Eve Denise Curie, segunda filha do casal Curie, tornou-se uma jornalista bem sucedida.

Durante a Primeira Guerra Mundial, Marie Curie doou as duas medalhas de ouro dos Prêmios Nobel para os esforços de guerra. Em 1920, iniciou um circuito de palestras em prol do Instituto do Rádio de Paris; em 1921, foi recebida triunfalmente nos Estados Unidos da América, onde conseguiu fundos para as pesquisas do Instituto. Oito anos depois, voltou aos Estados Unidos e recebeu do presidente Hoover 50.000,00 dólares, o suficiente para adquirir um grama de rádio. Ao falecer, em 1934, Curie foi enterrada em Sceaux, ao lado do marido. Em 1995, os restos mortais do casal Curie foram transferidos para o Panteão de Paris. Marie Curie foi a primeira mulher a receber tal honra. (HEWITT, 2011).

Madame Curie foi muito mais do que uma cientista premiada e famosa. Foi uma mulher extraordinária, que se destacou em uma época em que a figura feminina era associada à fragilidade, com total dependência do homem. O apoio de seu marido, sem dúvida, foi fundamental para a sua ascensão; Pierre foi um perfeito cavalheiro, ao dar espaço e liberdade à sua esposa.

As contribuições do casal Curie para a compreensão da radioatividade foram fundamentais; todavia, nos primeiros anos do século XX, o fenômeno ainda não estava explicado. Muitas perguntas estavam sem respostas. Afinal, as radiações eram iguais aos raios X ou não? De onde vinha a energia desses materiais radioativos? Por que alguns elementos eram radioativos e outros não? As explicações foram surgindo gradualmente ao longo dos primeiros anos do século XX, por meio de contribuições de vários cientistas que estudaram os raios emitidos por núcleos radioativos.

O jovem físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), da Universidade McGill em Montreal, Canadá, iniciou em 1898 estudos para entender os *raios de Becquerel*. No início de 1899, ao realizar experimentos com substâncias radioativas, Rutherford observou que estas emitiam dois tipos de radiação, identificadas a partir da trajetória de cada uma delas ao passar em um campo magnético. Rutherford classificou-as de acordo com a capacidade de penetrar a

matéria: a menos penetrante chamou de raios alfa (α) e a mais penetrante, de raios beta (β). Rutherford, a princípio, pensou que essas radiações fossem tipos diferentes de raios X. Em 1900, Paul Villard identificou um terceiro tipo de radiação muito mais penetrante, chamada de raios gama (γ), que, ao contrário dos raios alfa e beta, não sofria qualquer deflexão em campos magnéticos. Três anos depois, Rutherford observou que a radiação alfa era defletida elétrica e magneticamente, e concluiu que se tratava de partículas com carga elétrica positiva. (OKUNO, 2007).

Posteriormente a esses estudos, a natureza da radioatividade começou a ficar mais clara. Concluiu-se que os raios α são núcleos do átomo do elemento hélio, composto por dois prótons e dois nêutrons e, logo depois, que os raios β podem ser de dois tipos: elétrons ou pósitrons. Posteriormente, constatou-se que os raios γ são fótons ou ondas eletromagnéticas muito energéticas, de comprimento de onda muito pequeno. Concluiu-se, então, que os *raios de Becquerel* não eram diferentes tipos de raios X, mas sim, radiações nucleares (originadas dentro do núcleo atômico).

Se o elemento radioativo emite radiação gama e radiação corpuscular (partículas), então sua estrutura nuclear está se transformando. Após estudos realizados por Rutherford, Dorn e os Curie sobre a emissão radioativa do tório e do rádio, Ernest Rutherford e Frederic Soddy demonstraram que em certos processos radioativos ocorre uma transmutação de elementos (um elemento se transforma em outro). A Teoria das Transformações Radioativas foi apresentada em cinco artigos entre novembro de 1902 e maio de 1903 (MARTINS, 1998).

[...] a descoberta plena do fenômeno de radioatividade, envolvendo não apenas o contato inicial com o fenômeno mas também a descrição adequada de suas propriedades e a compreensão de sua natureza, foi um trabalho coletivo, realizado ao longo de vários anos e que se completou com a teoria de Rutherford e Soddy sobre a transmutação dos elementos (MARTINS, 2012, p. 416).

Esses e outros estudos conduziram, nas décadas seguintes, a um conhecimento adequado da radioatividade. Constatou-se que é um fenômeno pelo qual os núcleos atômicos instáveis se transformam ao emitirem radiações espontaneamente e, nesse processo, podem formar novos elementos químicos.

É inegável a contribuição de Becquerel nos estudos iniciais com os compostos de urânio; contudo, de acordo com a interpretação de Martins (1998; 2012), sua contribuição foi muito pequena e não podemos atribuir a ele a detecção do fenômeno de radioatividade e, sim,

ao resultado do trabalho coletivo de vários cientistas, apesar de muitos autores lhe atribuírem tal proeza.

3.3. O INÍCIO DA ERA NUCLEAR

A partir do ano de 1930 muitos cientistas investigavam a transmutação de elementos químicos provocada pelo bombardeamento com nêutrons de várias amostras, incluindo o urânio. Com isso, os cientistas procuravam descobrir novos elementos químicos artificiais. Na Universidade de Roma, uma equipe liderada pelo físico italiano Enrico Fermi (1901-1954), que trabalhava nessa linha, constatou que os elementos leves - do flúor em diante -, e os elementos de pesos atômicos médios, transmutavam-se em outros elementos (SAFFIOTI, 1982). Tais experimentos abriram o caminho que conduziu à fissão nuclear.

Segrè (1987) conta que Fermi havia deduzido que nêutrons, pelo fato de não possuírem carga elétrica, poderiam ser usados como projéteis para produzir reações nucleares mais efetivas. O casal Curie havia realizado, em seus experimentos pioneiros, o bombardeio do alumínio usando partículas alfa como projéteis; contudo, o rendimento obtido era muito baixo, visto que as partículas alfa eram repelidas pela ação da força eletrostática e não conseguiam penetrar no núcleo alvo. Em outubro de 1934, Fermi e equipe¹⁰, após intenso trabalho, concluíram que nêutrons lentos eram muito mais efetivos para produzir reações nucleares do que nêutrons rápidos. Relata Segrè (1987, p. 208): “Descobrimos, graças não só ao acaso mas também a uma boa dose de observação, que os nêutrons filtrados através da parafina eram muito mais efetivos para produzir reações nucleares do que aqueles que emergiam diretamente de uma fonte de radônio mais berílio”. Os nêutrons lentos viriam a ser a chave da energia nuclear.

Após 1935, a situação na Europa tornou-se alarmante, em virtude de uma guerra mundial prestes a ser deflagrada. A Itália aliou-se à Alemanha, leis antissemitas foram promulgadas e novas diretrizes políticas tornaram insustentável a vida para inúmeras pessoas. Muitos pesquisadores e pessoas informadas sabiam dos riscos que corriam se permanecessem nos países onde a situação política era dramática. Em virtude desses acontecimentos, o grupo de Roma acabou se dispersando.

¹⁰ A equipe, autora da pesquisa sobre radioatividade induzida por nêutrons, era composta pelos físicos E. Fermi, E. Segrè, O. D'Agostino, E. Amaldi, F. Rasetti e P. Pontecorvo.

Não obstante, as pesquisas na área de radioatividade prosseguiram. Segundo Hewitt (2011), em 1938 os químicos experimentais alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann haviam detectado o elemento bário após bombardearem com nêutrons uma amostra de urânio puro, mas os cientistas não conseguiram explicar o aparecimento do bário. A explicação foi dada pela física austríaca Lise Meitner (1878-1968), com a colaboração de seu sobrinho, o químico Otto Frisch. Meitner chegou à conclusão de que os núcleos de urânio haviam sido quebrados em núcleos menores, incluindo os de bário, havendo grande liberação de energia. Sua hipótese foi logo confirmada experimentalmente por Frisch. Meitner havia decifrado o processo de *fissão*, termo emprestado da biologia.

Meitner, na década de 1920, tornou-se a primeira mulher a ser nomeada professora universitária em Berlim. Embora fosse judia, conseguiu manter seu trabalho na Alemanha até 1938, mesmo após Hitler ter chegado ao poder, em 1933. Quando se sentiu ameaçada, viu-se obrigada a abandonar Berlim para salvar a própria vida. Com o auxílio de amigos alemães conseguiu fugir através de solo holandês, levando consigo apenas 10 marcos e um anel, presenteado pelo amigo Otto Hahn, para subornar os guardas da fronteira, se fosse necessário. Seguiu para a Suécia, onde recebeu asilo e estabeleceu colaboração profissional com Niels Bohr, e continuou a se corresponder com amigos cientistas alemães e com Hahn. (HEWITT, 2011; SEGRÈ, 1987).

Hewitt conta que, em dezembro de 1938, Hahn escreveu a Meitner relatando sobre a detecção do bário. No feriado de natal daquele ano, durante uma caminhada por um bosque de Estocolmo na companhia de seu sobrinho Otto Frisch, que a visitava, Meitner chegou à explicação do processo de fissão nuclear. Meitner escreveu uma carta ao colega Hahn expondo suas ideias. Hahn, juntamente com Strassmann, publicou em 1939 um artigo em que relatava os resultados experimentais obtidos quando o urânio era bombardeado com nêutrons. Em 1944 Hahn recebeu, sozinho, o Prêmio Nobel de Química, sem nunca mencionar o papel desempenhado por Meitner e Fritz.

3.3.1. A carta de Einstein ao presidente Roosevelt

A constatação de que grandes quantidades de energia podiam ser liberadas nos processos de fissão nuclear causou muitas especulações no meio científico. Ao mesmo tempo, acontecimentos políticos e militares na Europa forçaram muitos cientistas eminentes a

emigrar, principalmente para os Estados Unidos da América (EUA), entre os anos de 1939 e 1945. Alguns desses cientistas eram judeus ou tinham esposas judias. Em 1º de setembro de 1939 Adolf Hitler ordenou a invasão da Polônia, iniciando a Segunda Guerra Mundial.

Entre esses cientistas europeus que emigraram para os EUA estavam Niels Bohr, Albert Einstein e Enrico Fermi. As trocas de informações entre pesquisadores sobre a possibilidade de a emissão de nêutrons produzir novas fissões levaram às primeiras ideias a respeito da reação em cadeia. Cientistas do mundo todo perceberam, então, o grande potencial bélico da fissão nuclear, o que causou enorme repercussão nos meios políticos, sociais e militares.

Segundo Martins [200-], em 1939 nos Estados Unidos da América duas equipes começaram a estudar a emissão de nêutrons produzidos na fissão do urânio: a equipe do húngaro Leo Szilard e do canadense Walter Zinn, da Universidade de Colúmbia (EUA), e a equipe liderada por Fermi, juntamente com os colaboradores H. L. Anderson e H. B. Hauser, na Universidade de Chicago. Os dois grupos publicaram simultaneamente os resultados de seus estudos, em que mostravam a possibilidade da reação em cadeia utilizando nêutrons produzidos na fissão do urânio.

Fermi e o chefe do Departamento de Física da Universidade de Colúmbia, J. B. Pegram, entenderam que era importante informar o governo norte-americano sobre a possibilidade da construção de um novo dispositivo explosivo de origem nuclear. No meio acadêmico corriam rumores de que os nazistas preparavam uma arma nuclear. Os dois cientistas dirigiram-se a Washington. Pegram entregou uma carta ao almirante Stanford C. Hooper, assistente técnico do chefe de operações navais, em 16 de março de 1939. Dois dias depois Fermi foi recebido pelo Ministro da Marinha dos Estados Unidos da América. Fermi teve a oportunidade de realizar uma conferência com pesquisadores militares e civis e conseguiu a quantia de 1.500 dólares como apoio às pesquisas na Universidade de Colúmbia (MARTINS, 200-).

Os cientistas húngaros Leo Szilard, Edward Teller e Eugene Wigner, preocupados com a crescente ameaça nuclear alemã, se uniram para buscar o apoio de pessoas influentes. Os pesquisadores precisavam de mais recursos do governo federal para avançar, e, para tanto, contaram com o prestígio do físico Albert Einstein. Segundo Rhodes (2012), Szilard apresentou os cálculos da reação em cadeia do urânio a Einstein e ficou surpreso ao perceber que o colega não tinha ouvido falar da possibilidade de tal reação. Szilard elaborou uma carta, que depois foi revisada e assinada por Einstein. A histórica carta, datada de 2 de agosto de

1939, foi entregue por um intermediador, o economista Alexander Sachs, ao presidente americano Franklin Delano Roosevelt somente em 11 de outubro. O texto exprimia o seguinte:

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island
2 de Agosto de 1939

F. D. Roosevelt
Presidente dos Estados Unidos
Casa Branca
Washington, D. C.
Senhor:

Alguns trabalhos recentes de E. Fermi e L. Szilard, que me foram comunicados em manuscrito, levaram-me a crer que o elemento urânio possa ser transformado em uma nova e importante fonte de energia em um futuro próximo. Certos aspectos da situação que se criou parecem exigir atenção e, se necessário, rápida ação por parte da Administração. Creio, portanto, que é meu dever trazer a sua atenção para os seguintes fatos e recomendações:

No decorrer dos últimos quatro meses, foi provado - através do trabalho de Joliot na França, bem como de Fermi e Szilard na América - que é possível a criação de uma reação nuclear em cadeia em uma grande massa de urânio, através da qual vastas quantidades de energia e grandes quantidades de novos elementos semelhantes ao rádio são gerados. Agora, parece quase certo que isso possa ser conseguido em um futuro próximo.

Esse novo fenômeno levaria também à construção de bombas e é concebível - embora não tão certamente - que bombas extremamente poderosas de um novo tipo possam ser construídas. Uma única bomba deste tipo, carregada por um barco e explodida em um porto, pode muito bem destruir todo o porto, juntamente com parte do território circundante. Contudo, tais bombas podem muito bem revelar-se demasiado pesadas para o transporte por via aérea.

Os Estados Unidos têm apenas minérios de urânio de baixa qualidade e em quantidades moderadas. Há algumas boas reservas no Canadá e na Tchecoslováquia, mas a grande fonte de urânio está no Congo Belga.

Perante a situação, o senhor pode pensar que é desejável ter mais contato permanente entre a Administração e o grupo de físicos que trabalham em reações em cadeia nos Estados Unidos. Uma forma possível de alcançar este objetivo pode ser o senhor confiar esta tarefa a alguém de sua confiança que poderia, quem sabe, atuar em condição extraoficial. Sua tarefa pode compreender:

a) abordar aos Departamentos Governamentais, mantê-los informados sobre o desenvolvimento e apresentar recomendações para a ação do Governo, dando especial atenção ao problema de garantir fornecimento de minério de urânio para os Estados Unidos;

b) acelerar o trabalho experimental, que está atualmente sendo feito dentro dos limites dos orçamentos dos laboratórios das universidades, fornecendo fundos, caso sejam necessários, pelo contato com pessoas privadas dispostas a contribuir para esta causa, talvez, inclusive, buscando a cooperação de laboratórios industriais que têm o equipamento necessário.

Eu entendo que a Alemanha realmente parou a venda de urânio das minas da Tchecoslováquia que ela assumiu. Talvez se compreenda por que haja tomado essa ação rápida, pelo fato do filho do SubSecretário de Estado Alemão, von Weizsäcker, ser ligado ao Kaiser-Wilhelm-Institut, em Berlim, onde alguns dos trabalhos americanos sobre o urânio estão agora sendo repetidos.

Atenciosamente,



(Albert Einstein)

Fonte: http://pt.wikisource.org/wiki/Carta_de_Albert_Einstein_para_Franklin_Delano_Roosevelt.

O texto alertava sobre a possibilidade de os alemães estarem trabalhando no desenvolvimento de armas nucleares. De acordo com Martins [200-], após a leitura da carta Roosevelt decidiu agir imediatamente. Foi criada a Comissão do Urânio, da qual faziam parte militares do governo norte-americano, os cientistas húngaros Szilard, Wigner e Teller, e o físico italiano Enrico Fermi, com a finalidade de desenvolver atividades nucleares bélicas.

Em 1940 foram convidados para integrar a comissão, em conjunto com os europeus, cientistas de nacionalidade norte-americana, entre eles os físicos Arthur Holly Compton e Ernest Orlando Lawrence. Roosevelt também criou o *National Defense Research Committee*

– NDRC (Comitê de Pesquisa de Defesa Nacional), com o intuito de desenvolver pesquisas voltadas a problemas de defesa, como também de coordenar a Comissão do Urânio.

Os trabalhos experimentais, conduzidos por Fermi, tiveram início na Universidade de Colúmbia; mas em dezembro de 1941, dois anos após a criação da Comissão, pouco se tinha avançado. Até então, a produção de combustível nuclear (urânio-235 e plutônio-239), as únicas substâncias adequadas conhecidas naquela ocasião, ainda era insuficiente para a construção de um artefato nuclear. Os físicos norte-americanos Compton e Lawrence foram convidados a participar mais ativamente das pesquisas científicas. Com o objetivo de acelerar o projeto nuclear, Compton conseguiu que os trabalhos fossem transferidos da Universidade de Colúmbia para a Universidade de Chicago, onde foi formada uma grande organização. Os trabalhos ficaram concentrados no que foi chamado de *Metalurgical Laboratory*. Lá, a equipe de Fermi desenvolveu um sistema mais eficiente para a produção de uma quantidade maior de urânio-235: o primeiro reator de fissão nuclear.

Em 7 de dezembro de 1941 o Japão atacou a base aeronaval norte-americana de Pearl Harbor, no Havaí. Mais de dois mil soldados morreram. O ataque resultou na entrada na Segunda Guerra Mundial dos EUA, que até então tinham apenas uma participação indireta no conflito.

3.3.2. O Projeto Urânio: primeiro reator de fissão

Na Universidade de Chicago, o grupo de cientistas liderados por Fermi conseguiu produzir a primeira reação em cadeia artificial no dia 2 de dezembro de 1942. Para isso, os pesquisadores construíram um reator nuclear de pesquisa, chamado de *pilha atômica* CP-1 (*Chicago Pile-1*), para produzir a primeira reação em cadeia autossustentada. O reator foi construído sob as arquibancadas da quadra de *squash* do ginásio da Universidade. O plano secreto foi chamado de *Projeto Urânio*. (HEWITT, 2011).

De acordo com Saffioti (1982), foram necessárias 40 toneladas de urânio natural (com 15% de urânio metálico), 393 toneladas de grafite como moderador e 92 toneladas como refletor, além das barras de controle e outros dispositivos de segurança. Para determinar o moderador que seria usado, Fermi e colaboradores realizaram experiências com várias substâncias diferentes, até fixarem-se no grafite. A construção do reator e o processo de reação em cadeia controlada seguiram os seguintes passos:

- O urânio natural foi dividido em barras discretas, as quais foram introduzidas no grafite em intervalos regulares de modo a formar pilhas, daí a origem do termo *pilha atômica*.
- As barras de controle, constituídas de metal, foram introduzidas na câmara de fissão em número e profundidade convenientes. Fermi usou o metal cádmio.
- Em princípio, Fermi precisou de uma fonte de rádio-berílio para fornecer os nêutrons necessários e dar início à reação em cadeia.
- Iniciada a fissão do urânio-235, o número de átomos fissionados aumenta por unidade de tempo. Desse modo, a intensidade da reação vai aumentando, até atingir o nível desejado.

O reator nuclear CP-1 foi submetido a testes, com sucesso. Naquele 2 de dezembro de 1942, os cientistas envolvidos comemoraram com grande entusiasmo os resultados do Projeto Urânio: era o início da Era Nuclear. A pilha atômica foi utilizada para a formação de técnicos e em testes, fornecendo os conhecimentos necessários para a construção da bomba atômica. O equipamento foi desmontado em 1943 e seu material foi aproveitado para a construção do segundo reator experimental, o *Chicago Pile-2 (CP-2)*.

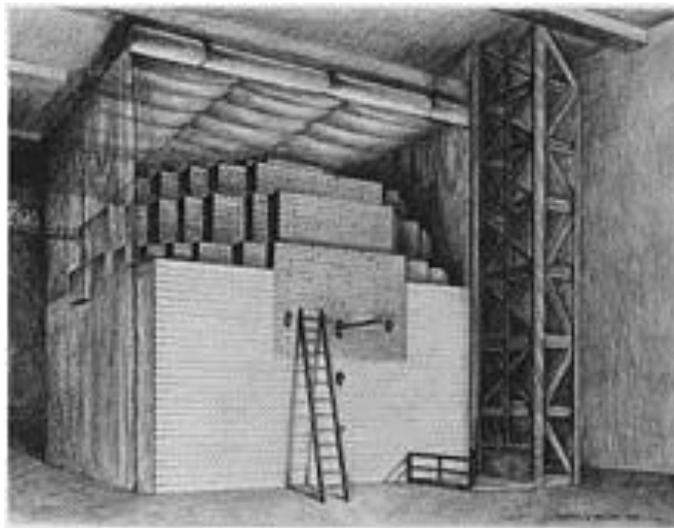


Figura 1: Primeiro reator nuclear, o *Chicago Pile-1 (CP-1)*.
Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/Stagg_Field_reactor.jpg/220px-Stagg_Field_reactor.jpg.

3.3.3. O Projeto Manhattan

O Projeto Manhattan – o maior projeto secreto da história militar - foi lançado em junho de 1942 pelo governo dos Estados Unidos da América (EUA). Envolveu cerca de 130 mil pessoas. O objetivo era construir a primeira bomba atômica do mundo. A crença era que seria conferido poder absoluto ao país que possuísse a poderosa arma (MARSHALL, 1990). Na ocasião do lançamento do Projeto a equipe de Enrico Fermi estava prestes a realizar a primeira reação em cadeia com o reator nuclear de pesquisa CP-1. Em setembro daquele ano o General Leslie Richard Groves (1896-1970) fora nomeado comandante militar do Projeto, com a finalidade de dirigir os trabalhos de aplicações bélicas da energia nuclear.

Groves era do corpo de engenheiros do exército e, entre outras realizações importantes, fora responsável pela construção do Pentágono. Era visto no meio militar como rigoroso e eficaz, qualidades necessárias para liderar o projeto ultrassecreto. A primeira ação do general foi criar os centros de engenharia. No interior do Novo México, a 48 quilômetros da cidade de Santa Fé, existia a Escola de Equitação de Los Alamos. Com a deflagração da Segunda Guerra Mundial a escola entrou em crise, mas os proprietários não perderam a oportunidade para superar os dias difíceis quando o governo norte-americano mostrou interesse em comprar toda a propriedade, em novembro de 1942. Em Los Alamos foi estabelecido o laboratório principal do Projeto Manhattan, o centro nervoso onde as bombas atômicas seriam construídas. O local era propício para a instalação das edificações, uma vez que a antiga estrutura da escola de equitação oferecia as acomodações necessárias aos engenheiros, técnicos e cientistas para o início das obras.

Além de Los Alamos, Groves estabeleceu mais dois grandes centros de engenharia em cidades remotas dos EUA: o de Oak Ridge, no Tennessee, e o de Hanford, no estado de Washington. De acordo com dados do *The National Museum of Nuclear Science & History*, mais de mil famílias foram deslocadas das terras rurais em Oak Ridge e cerca de 1.500 pessoas tiveram que ser realocadas em Hanford. Outros locais também desenvolveram pesquisas ligadas ao Projeto, conforme mostra o mapa da figura 2.



Figura 2: Locais de pesquisa importantes do Projeto Manhattan, nos EUA.
 Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Manhattan_Project_US_Map.png.

O cientista norte-americano Jullius Robert Oppenheimer (1904-1967), físico teórico e professor da Universidade de Berkeley, foi indicado por Groves para liderar a parte científica do projeto. Oppenheimer ficou encarregado de selecionar nas universidades e institutos a equipe de renomados cientistas norte-americanos e europeus para dar início aos trabalhos em Los Alamos. Filho de uma rica família judaica, Oppenheimer foi criado em um luxuoso apartamento de Nova Iorque. Era respeitado no meio acadêmico e admirado por seus alunos; suas aulas e palestras tinham um estilo sofisticado e envolvente, de constante desafio. Groves o considerava brilhante, um gênio, e depositou nele a confiança para dirigir os trabalhos científicos.

Em meados de 1943, Groves e Oppenheimer, líderes militar e científico, respectivamente, haviam reunido em Los Alamos uma numerosa e altamente qualificada equipe de técnicos, especialistas na área militar e cientistas. De acordo com Mourão (2005), cerca de vinte Prêmios Nobel fizeram parte da equipe de centenas de cientistas e mais dois mil técnicos civis e militares. Uma das principais tarefas dos físicos e químicos envolvidos era determinar que combustível seria usado na bomba nuclear (urânio-235 ou plutônio-239), como também a quantidade de massa físsil que seria necessária. Para criar o combustível, cientistas em Oak Ridge trabalhavam na extração do urânio-235 a partir do urânio natural, enquanto no centro de Hanford o objetivo era produzir o plutônio-239.

Na década de 1940 os métodos conhecidos para a separação de isótopos de urânio eram o eletromagnético e o da difusão gasosa. Em Oak Ridge foram usadas as duas técnicas. De acordo com Hewitt (2011), tais processos de separação eram tarefas bem mais complexas do que o utilizado atualmente, que emprega avançadas centrífugas. Na separação eletromagnética de isótopos é usado um espectrômetro de massa. Nesse processo, uma corrente de íons de urânio é arremessada através de um campo magnético. Os íons de urânio-235, que possuem menor massa, sofrem maior desvio pelo campo magnético do que os íons de urânio-238, e são capturados átomo a átomo por uma fenda adequadamente posicionada para coletá-los. Na separação por difusão gasosa é empregado o composto gasoso de hexafluoreto de urânio. As moléculas que contêm o urânio-235 se movem com velocidade ligeiramente maior do que as moléculas mais pesadas, que contêm o urânio-238 à mesma temperatura. As moléculas mais leves têm uma taxa de difusão maior do que as mais pesadas e se difundem mais rapidamente por uma fina membrana, ou por uma pequena abertura, por onde se obtém um gás ligeiramente enriquecido. A difusão gasosa, por meio de milhares de câmaras, foi capaz de produzir uma amostra razoável de urânio-235. Os cientistas projetistas de Oak Ridge levaram cerca de dois anos para extrair urânio-235 do minério de urânio natural em quantidade suficiente para construir a bomba atômica.

Em Hanford foram construídos três grandes reatores nucleares para a produção de plutônio-239. O químico norte-americano Glenn Seaborg¹¹, descobridor do plutônio, foi o líder da equipe. Em maio de 1944 começou a busca por um local para o primeiro teste nuclear. Era necessário que a região fosse plana, afastada de áreas povoadas e a uma distância razoável de Los Alamos. A deserta região conhecida como Jornada del Muerto, que pertencia à Base Aérea de Alamogordo, foi escolhida para a detonação do artefato nuclear. O local reservado para o teste distava 320 quilômetros do sul de Los Alamos. Oppenheimer, inspirado por um poema de John Donne¹², escolheu o codinome Trinity para o local.

Los Alamos produziu duas bombas atômicas: a *Little Boy (Garotinho)*, de urânio-235, e a *Fat Man (Homem Gordo)*, de plutônio-239. Segundo Rhodes (2012), o químico austríaco Otto Frish, que havia confirmado experimentalmente a hipótese de Lize Meitner sobre a fissão nuclear, era o líder do grupo empenhado na produção de massa crítica de urânio-235

¹¹ Prêmio Nobel de Química em 1951, Seaborg e sua equipe foram responsáveis pela identificação do elemento sintético *plutônio* em 1941, e dos elementos químicos transurânicos amerício, berquélio, califórnio, cúrio, einstênio, fêrmio, mendelévio e nobélio, além da identificação de diversos isótopos de elementos químicos.

¹² O poema do inglês John Donne, do século XVII, refere-se ao paradoxo de um deus que destrói para poder renovar. A alusão de Oppenheimer ao poema sugere que, para ele, a bomba atômica era uma arma que mataria, mas que acabaria com a guerra e redimiria a humanidade.

em Oak Ridge. Frish e sua equipe desenvolveram um programa de experimentos para a construção do mecanismo de detonação da bomba de urânio. Os cientistas realizaram um experimento de fundamental importância, denominado *Dragon* (Dragão), com o intuito de determinar a quantidade de massa crítica que seria necessária para a bomba *Little Boy*. Eles trabalharam no limite, com uma quantidade de massa suficiente para iniciar uma explosão sem, no entanto, explodir. O experimento permitiu que fizessem a adequação, entre a teoria e a prática, da medida de massa crítica de urânio-235.

No início de fevereiro de 1945 a central de Hanford conseguiu produzir as primeiras porções de plutônio-239 para o teste nuclear e para a montagem da bomba *Fat Man*. Pequenos lotes de massa subcrítica, acondicionados em recipientes de metal, começaram a ser transportados em caixas de madeira para Los Alamos em comboios do exército. Em abril, Frish comunicou a Oppenheimer que Oak Ridge havia produzido a quantidade necessária de massa crítica de urânio-235 para a bomba *Little Boy*, contudo, o material não era suficiente para a realização de um pré-teste. Sob escolta militar, o material foi enviado para Los Alamos. (RHODES, 2012).

De acordo com Rhodes, os EUA, preocupados com a possibilidade do desenvolvimento da arma nuclear nazista, organizaram uma missão militar de captura dos cientistas envolvidos no projeto nuclear alemão. A missão foi chamada de *Alsos*.

Washington queria provas concretas de que a Alemanha não havia desenvolvido a bomba atômica. A missão encontrou os laboratórios de pesquisa nuclear, como também os estoques de minério de urânio que os nazistas haviam confiscado da Bélgica em 1940. Os militares obtiveram informações de que os cientistas alemães estavam localizados em uma região da Floresta Negra, na cidade resort de Haigerloch. No final de abril de 1945 a força norte-americana chegou a Haigerloch. Lá os militares constataram que, embora os cientistas alemães tivessem se empenhado na construção de uma pilha atômica, a bomba nuclear nazista não representava uma ameaça imediata. Todos os cientistas envolvidos no projeto nuclear nazista foram capturados pela missão *Alsos*, em Haigerloch, exceto Otto Hahn, que foi capturado em Tailfingen, dois dias depois, e, Werner Heisenberg, localizado mais tarde com sua família na região da Bavária. Não obstante, a missão *Alsos* tinha ainda mais um objetivo: impedir que os soviéticos capturassem os líderes do grupo de cientistas nucleares alemães e tomassem posse de um volume significativo de minério de urânio de alta qualidade.

Harry S. Truman (1884-1972) havia assumido a presidência dos EUA após a morte de Roosevelt, ocorrida em 12 de abril de 1945. Com um novo presidente, alguns cientistas em

Los Alamos ficaram na expectativa sobre o prosseguimento ou não dos trabalhos. Truman tinha um conhecimento superficial da existência do projeto ultrassecreto. Horas depois da morte de Roosevelt o presidente recebeu as primeiras informações oficiais sobre a construção das bombas atômicas, mas coube ao general Groves e ao Secretário de Guerra, Henry L. Stimson, passar-lhe um relatório mais detalhado.

Em 7 de maio a Alemanha se rendeu incondicionalmente, encerrando-se a guerra na Europa; todavia, o Japão hesitava em fazer os acordos para a sua rendição. Aconteceram várias discussões entre Truman e seus conselheiros a respeito do uso das bombas atômicas no Japão, com o intuito de pôr fim à guerra. Em suas memórias, o presidente norte-americano relata que tinha conhecimento de que a arma nuclear era muito poderosa, capaz de aniquilar cidades inteiras e matar pessoas em escala sem precedentes. Ao mesmo tempo, Truman considerou a possibilidade de os EUA ditarem os próprios termos do fim da guerra (RHODES, 2012). Desse modo, interesses políticos priorizaram o Estado e levaram o governo norte-americano à continuidade do Projeto Manhattan.

Um Comitê de Alvos (*Target Committee*) formado por dois oficiais da força aérea e cinco cientistas, incluindo o matemático húngaro John von Neumann¹³ e o físico britânico William G. Penney, e presidido por um general de brigada, tinha a incumbência de definir os alvos japoneses das bombas atômicas. Von Neumann ficou responsável pela computação e Penney por prever os efeitos que seriam gerados pela explosão. O grupo se reuniu pela primeira vez em uma sala de conferências do Pentágono. No encontro, Groves apresentou detalhadamente o Projeto Manhattan. O Comitê ficou incumbido em estabelecer os prováveis alvos (urbano ou industrial), os destinos alternativos e o melhor mês (julho, agosto ou setembro). Segundo Rhodes (2012), o grupo estudou dezessete cidades, entre elas Tokyo, Hiroshima, Nagasaki, Nagoya, Kobe, Osaka e Yokohama. Uma das preocupações era o clima da região no dia do ataque. Para contornar esse problema, o Comitê decidiu que aviões de reconhecimento deveriam ser enviados com antecedência para confirmar a visibilidade dos alvos escolhidos.

O governo criou o Comitê Interino (*Interim Committee*) formado por militares e representantes do governo dos EUA, para, juntamente com o Comitê de Alvos, discutir e definir todos os detalhes para o lançamento das bombas atômicas no Japão. Os cientistas Arthur Compton, Ernest Lawrence, Robert Oppenheimer e Enrico Fermi foram nomeados

¹³ Von Neumann, matemático brilhante de origem judaica, contribuiu para o desenvolvimento da ciência da computação, mecânica quântica, hidrodinâmica das explosões, balística, meteorologia, estatística, teoria dos conjuntos, álgebra e teoria dos jogos. Segundo Rhodes (2012), von Neumann desenhou o mecanismo de implosão da bomba atômica de plutônio, que foi lançada em Nagasaki em 1945.

como consultores. De acordo com Rhodes (2012), nas discussões do Comitê Interino não foi esquecida a questão dos efeitos da radiação nuclear no ser humano, porém o grupo estava mais preocupado com o perigo nas tripulações dos aviões que lançariam as bombas do que com os japoneses.

O Comitê Interino recomendou ao Secretário de Guerra que as bombas fossem lançadas o mais breve possível sobre o Japão, sem aviso prévio. A recomendação foi transmitida ao presidente norte-americano. No dia 1º de junho de 1945, Truman, aconselhado por seu Secretário de Estado, James Byrnes, tomou a decisão de usar as poderosas armas.

Em junho de 1945, 155 cientistas do Projeto Manhattan assinaram uma petição requerendo que fosse realizada uma demonstração com a bomba atômica sobre uma região desabitada, antes de ser usada sobre civis japoneses. Ao tomar conhecimento do fato, o general Groves proibiu que a carta circulasse em Los Alamos, conseguindo, assim, abafar o pedido dos cientistas.

O Projeto Manhattan avançou para a fase de testes nucleares. Os cientistas, engenheiros e especialistas estavam seguros de que o mecanismo de explosão desenvolvido para a bomba de urânio teria êxito, mas precisavam confirmar se o complexo modelo de implosão projetado para a bomba de plutônio funcionaria adequadamente. Além do mais, não era possível realizar um teste para a bomba de urânio, uma vez que Oak Ridge não havia produzido material suficiente para tanto.

O primeiro teste nuclear aconteceu no dia 16 de julho de 1945. O dispositivo tinha forma quase esférica e não era exatamente uma bomba, uma vez que não foi lançado. Os preparativos finais para o teste começaram no dia 12 daquele mês. O núcleo de plutônio foi inserido no interior do dispositivo e este foi depois erguido no alto de uma torre de aço de 30 metros de altura. A base da torre correspondia ao marco zero. O detonador de explosivos foi instalado somente após o artefato atingir o topo da torre.

Os físicos James Chadwick¹⁴, Edward Teller¹⁵, Ernest Lawrence, Hans Bethe, Robert Serber e Edwin McMillan, e mais uma multidão de visitantes de Los Alamos, assistiram ao teste em Compañia Hill, uma colina situada a noroeste da torre, a 32 quilômetros de distância. Chadwick queria ver o que os nêutrons eram capazes de fazer. No Acampamento Base de Trinity, Oppenheimer e outros cientistas e militares observaram a uma distância de 16 quilômetros do marco zero. O general Groves acompanhou de outro ponto. Os observadores

¹⁴ O físico britânico Chadwick ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1935 pela confirmação do nêutron, ocorrida em 1932 depois de uma série de experimentos.

¹⁵ Teller, físico teórico húngaro, ajudou na construção da bomba atômica de plutônio, como também dirigiu os estudos teóricos da bomba de hidrogênio em Los Alamos.

usaram óculos especiais para proteção da retina. Trinity seria o maior experimento de Física já realizado até aquele momento. Iniciou-se a contagem regressiva em zero menos 20 minutos. Às 05h29min45s aconteceu a detonação. (RHODES, 2012).

O teste foi bem-sucedido. A explosão foi equivalente a 20 mil toneladas de TNT (trinitrotolueno). Formou-se uma grande bola de fogo com uma luz extremamente intensa, seguida de ondas de calor e um forte abalo. O cogumelo atômico atingiu cerca de 12 quilômetros de altura. Abriu-se uma cratera com 10 metros de profundidade e 730 metros de diâmetro, onde a areia do deserto transformou-se em vidro de cor esverdeada. Há relatos de que a luz que iluminou o céu pôde ser vista à distancia de até 240 quilômetros. A onda de choque e o som da explosão foram percebidos ao longo de 320 quilômetros do marco zero. A realização do primeiro teste nuclear é considerada o início da Era Nuclear. A partir daquele momento, o mundo não seria mais o mesmo.

Em julho de 1945, Szilard encaminhou ao presidente Truman uma petição, assinada por 69 cientistas, tentando convencê-lo do perigo de destruição do uso de armas nucleares. No pedido, Szilard prevê que a nação que usasse a poderosa arma poderia ter que assumir a responsabilidade de abrir a porta para uma era de devastação em escalas jamais imaginadas (MOURÃO, 2005).

Entre 17 de julho e 2 de agosto de 1945 Truman se reuniu em Potsdam, Alemanha, com os chefes dos países aliados - o primeiro-ministro britânico Winston Churchill e o premiê soviético Joseph Stalin -. Na abertura da Conferência de Potsdam, Truman já havia tomado conhecimento do bem-sucedido teste Trinity. A Conferência objetivava discutir estratégias para acabar com a guerra no Pacífico. Os aliados aprovaram os planos militares para a invasão e elaboraram uma declaração para a rendição incondicional do Japão. A declaração da Conferência de Potsdam foi transmitida ao governo japonês, mas o primeiro-ministro anunciou que iria ignorar o ultimato dos aliados. No final da Conferência, Truman, com forte apoio dos mais altos escalões do governo e das Forças Armadas dos EUA, levou adiante a decisão de usar as bombas atômicas. Os militares norte-americanos temiam que os soviéticos tomassem parte do acordo pós-guerra e dividissem o Japão em duas nações, uma comunista e outra capitalista, tal qual havia ocorrido com a Alemanha. As autoridades também alegaram que o uso das bombas evitaria uma grande invasão do território japonês, a qual incluiria cerca de 1,5 milhão de soldados, com provável expressivo custo de vidas. Além do mais, os militares precisavam justificar ao Congresso dos EUA o custo de US\$2 bilhões (cerca de US\$26 bilhões corrigidos em 2013) que foram gastos no Projeto Manhattan.

Little Boy foi a primeira bomba atômica usada no Japão, na cidade de Hiroshima. O piloto do bombardeiro modelo B-29 que transportou a bomba denominou a aeronave de *Enola Gay*, nome dado em homenagem a sua mãe, porque ele havia lhe assegurado que não seria morto em combate aéreo. Na madrugada de 6 de agosto de 1945, sob escolta de dois bombardeiros, o *Enola Gay* partiu da base aérea na ilha de Tinian, no Pacífico, transportando a *Little Boy*. Três aeronaves meteorológicas haviam saído com antecedência para checar o tempo e a visibilidade dos quatro alvos previamente escolhidos: Hiroshima, Kyoto, Yokohama e Kokura Arsenal. Os detonadores da bomba foram armados somente durante o voo, para evitar riscos de explosão durante a decolagem. O dia amanheceu ensolarado em Hiroshima. O avião meteorológico que sobrevoou a cidade enviou uma mensagem ao comando avisando que a visibilidade local era boa e era o melhor alvo, selando o destino de Hiroshima. A ponte em forma de “T” sobre o Rio Aioi, na região central da cidade, foi o ponto escolhido para o alvo, visto que era facilmente avistada do avião. *Little Boy* explodiu às 8h16min02s, hora de Hiroshima, 43 segundos após ter sido lançada do *Enola Gay*, a 579 metros acima do pátio do Hospital Shima, com um desvio de apenas 167 metros a sudeste do ponto de mira. Truman foi comunicado sobre o bombardeio durante o almoço a bordo do navio *Augusta*, quando voltava para casa depois da reunião de Potsdam. (RHODES, 2012).

A explosão de *Little Boy* foi equivalente a 12,5 mil toneladas de TNT, produziu uma luz extremamente intensa com duração de menos do que um décimo de segundo, seguida de tremendas ondas de calor. Estudos realizados posteriormente mostraram que, para produzir os efeitos observados em Hiroshima, a temperatura deve ter alcançado aproximadamente 2.980 °C (5.400 °F). Na ocasião, Hiroshima contava com 280.000 a 290.000 habitantes civis, mais cerca de 43.000 militares (RHODES, 2012), além de um número desconhecido de trabalhadores na cidade provenientes de outras regiões. Não há dados precisos sobre as perdas de vidas. De acordo com informações da instituição nipo-americana *Radiation Effects Research Foundation – RERF* (c2007), estima-se que entre 90.000 e 166.000 pessoas tenham morrido durante o bombardeio e nos quatro primeiros meses que se seguiram. Essas mortes foram causadas por ferimentos e queimaduras em virtude da esmagadora força das ondas de choque e do intenso calor. Poucos sobreviveram no local do hipocentro. Segundo Rhodes (2012), em um raio de 800 metros da bola de fogo produzida pela bomba atômica, a energia térmica extremamente intensa levou não somente à carbonização de pessoas, mas também à evaporação. A silhueta de alguns corpos ficou marcada no chão como se fosse uma sombra. As pessoas que sofreram queimaduras mais graves estavam a uma distância entre 1,0 e 1,6

quilômetro do hipocentro, mas aquelas que se encontravam em um raio de até 4 quilômetros também sofreram sérias queimaduras. O gráfico da figura 3 demonstra a relação entre a percentagem de mortes ocorridas e a distância do hipocentro.

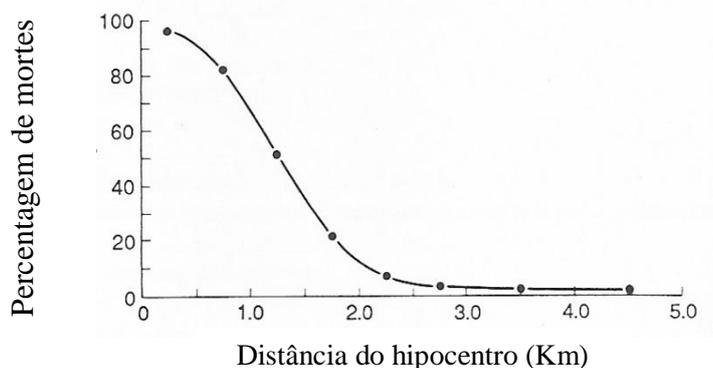


Figura 3: Gráfico da percentagem de pessoas mortas em Hiroshima em relação à distância do hipocentro de explosão da bomba atômica.

Fonte: Rhodes (2012, p. 746).

Os relatos dos sobreviventes sobre a aparência das pessoas feridas e queimadas logo após a explosão são impressionantes. Noventa por cento do corpo médico perderam a vida no bombardeio ou se feriram gravemente. Dos 76.000 edifícios, 70.000 foram danificados, queimados ou destruídos totalmente. Hiroshima foi praticamente devastada. Rhodes comenta que estimativas mais recentes apontam que cerca de 200.000 pessoas que viviam em Hiroshima morreram entre o dia do bombardeio e os cinco anos seguintes.

Fat Man foi lançada em Nagasaki três dias depois de *Little Boy*, explodindo às 11h02min de 9 de agosto, com uma potência equivalente a 22 mil toneladas de TNT. A tripulação do avião bombardeiro encontrou o céu nublado e foi autorizada a lançar a bomba por radar. No último minuto um buraco se abriu nas nuvens e a bomba de plutônio foi lançada, explodindo a pouco mais de 500 metros acima de encostas íngremes da cidade e perto da maior igreja cristã do Japão, a vários quilômetros do ponto original de alvo. Embora a bomba de plutônio fosse mais potente do que a de urânio, as colinas confinaram a maior parte da explosão, causando menos danos e menos perdas de vidas do que em Hiroshima. Segundo a instituição *Radiation Effects Research Foundation – RERF* (c2007), estima-se que entre 60.000 e 80.000 japoneses perderam a vida no dia da explosão e nos quatro primeiros meses que se seguiram. Levantamentos mais recentes apontam que entre o dia do ataque e os cinco anos seguintes, cerca de 140.000 pessoas que viviam em Nagasaki morreram em

decorrência de *Fat Man* (RHODES, 2012). Durante as décadas que se seguiram, estudos realizados entre os sobreviventes das duas bombas atômicas constataram que ocorreram muitas mortes em virtude da exposição à radiação nuclear, cujos efeitos abordamos no capítulo 4º.

As bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki apresentaram ao mundo a Era Nuclear. “A contradição da ciência está em poder salvar ou exterminar o homem” (MARSHALL, 1990, p. 1). Após o bombardeio de Nagasaki, o Imperador japonês, Hirohito, com objeções de seus ministros, decidiu pôr fim à guerra em 15 de agosto de 1945, citando a mais nova e mais cruel bomba em sua proclamação de rendição.

RADIAÇÕES NUCLEARES: EFEITOS, RISCOS E BENEFÍCIOS

4.1. OS EFEITOS BIOLÓGICOS NOCIVOS DA RADIOATIVIDADE

De acordo com Okuno (2007), logo após a descoberta dos raios X e da radioatividade, quase nada se sabia sobre os efeitos nocivos imediatos que a radiação ionizante pode provocar nos seres humanos, tampouco sobre os efeitos tardios. Os primeiros sinais foram percebidos por alguns médicos, que associaram a acentuada queda de seus cabelos com as radiografias que haviam tirado de seus próprios crânios. Queimaduras na pele também foram notadas em virtude do uso de raio X. Para verificar se a radiação ionizante provocava algum dano ao ser humano, em 1896, Elihu Thomson expôs durante meia hora por dia, a uma distância de menos de 3 cm do tubo de raio X, o seu dedo mínimo esquerdo à incidência direta da radiação. Após alguns dias, Thomson sentiu fortes dores e percebeu uma inflamação no dedo irradiado, concluindo que os raios X não poderiam ser utilizados além de certo limite.

Os efeitos nocivos da radioatividade também foram logo percebidos. Os primeiros cientistas que estudaram o fenômeno tiveram queimaduras na pele e alguns deles morreram em consequência de leucemia ou de outros tipos de câncer. Alguns pesquisadores precursores fizeram testes no próprio corpo para observar os efeitos dos materiais radioativos. Até Becquerel, que carregava um frasco contendo uma amostra de rádio no bolso da camisa para demonstrações em conferências, notou queimaduras em sua pele. Madame Curie faleceu em decorrência de anemia aplástica, provavelmente provocada pela exposição aos minerais radioativos durante os inúmeros experimentos que realizou.

O uso das radiações era visto como solução para muitos males. O rádio foi usado desenfreadamente na década de 1920 para o tratamento de diversas doenças, tais como artrite, gota, ciática, nevralgia, lumbago, sífilis e outras. Surgiram muitos produtos como cosméticos, chocolates, cigarros, águas, cremes dentais e até supositórios que continham elementos radioativos. Em New Jersey, entre 1917 e 1924, cerca de 800 moças trabalhavam na indústria pintando mostradores e ponteiros de relógios com uma solução luminescente contendo rádio. As jovens afinavam o pincel nos lábios. Constatou-se que 41 dessas moças morreram até o ano de 1950, em decorrência de câncer nos ossos e anemia aplástica. Em 1931, mesmo após a ampla divulgação dos males causados às jovens de New Jersey, um hospital de Illinois

administrou solução de rádio a 32 pacientes com doenças mentais (OKUNO, 2007; OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Segundo Okuno e Yoshimura (2010), aos poucos os efeitos biológicos imediatos e tardios do uso da radioatividade foram se tornando conhecidos. Em 1929 os Estados Unidos da América criaram o Comitê Nacional de Proteção Radiológica e, em 1941, apresentaram as primeiras orientações para o uso do rádio.

A ação da radioatividade é microscópica e imperceptível. É invisível, inodora, inaudível, insípida. Uma pessoa não percebe quando está sendo irradiada, pois não sente absolutamente nada quando está recebendo uma dose de radiação. Quando um indivíduo é exposto a doses altas de radiação nuclear, a síndrome aguda aparece logo após, ao passo que, se a dose for baixa, os efeitos só podem ser percebidos muitos anos depois.

De acordo com Okuno (2007), no corpo humano os efeitos biológicos da radioatividade passam por quatro estágios. O primeiro estágio - o *físico* - ocorre logo após a incidência da radiação e dura cerca de um quatrilionésimo de segundo. Nessa fase o corpo absorve a energia de radiação, que provoca o fenômeno da ionização e da excitação de átomos. A ionização dos átomos causa um desequilíbrio eletrostático nas moléculas, levando ao segundo estágio. O segundo estágio, com duração de um milionésimo de segundo, é chamado *físico-químico*. As ligações químicas entre as moléculas são rompidas com a formação de radicais livres, os quais são altamente reativos. O terceiro estágio é o *químico*, com duração de poucos segundos. Nessa fase os radicais livres ligam-se a moléculas importantes da célula, como enzimas, proteínas e moléculas de DNA, e as danificam. As novas células que surgem da célula danificada podem reter a informação genética alterada, ou seja, produzir uma mutação. Embora o organismo tenha mecanismos para reparar os danos e recompor as moléculas lesadas pelos radicais livres, é impossível reparar o estrago. Assim, os danos vão se acumulando no corpo durante toda a vida. No quarto estágio ocorrem os efeitos *bioquímicos e fisiológicos*, cuja duração varia desde horas até anos, quando são produzidas alterações morfológicas e/ou funcionais nos órgãos.

Conforme descreve Nouailhetas [200-], os efeitos da radiação natural ionizante no homem dependem basicamente da dose absorvida pelo corpo (alta/baixa), da taxa de exposição (aguda/crônica) e da forma de exposição (corpo inteiro/localizada). A questão é de probabilidade de dano, ou seja, quanto maior a dose e a taxa de exposição, maior é a probabilidade de morte celular e de desenvolver doenças como o câncer.

Três unidades diferentes são usadas para medir os efeitos da radiação nos seres vivos: o *Gray* (Gy), o *Sievert* (Sv) e o *Roentgen* (R). A dose de radiação absorvida se relaciona com a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de massa. É a medida mais importante no que se refere a danos biológicos. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a medida de dose de radiação absorvida é o *gray* (Gy), em homenagem ao físico e radiologista inglês Louis Harold Gray, sendo:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg}$$

A unidade original era dada em *rad* (*radiation absorbed dose*, ou seja, dose de radiação absorvida). Foi introduzida em 1950, em virtude da necessidade de se saber a quantidade de energia a ser fornecida no tratamento de tumores malignos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010), sendo:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/Kg} \text{ ou } 1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$
$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de dose equivalente, de dose efetiva e do equivalente de dose pessoal é o *sievert* (Sv). A unidade original era o *rem* (*roentgen equivalent in man*, ou seja, equivalente do *roentgen* no homem). O *rem* é definido como a dose que causa o mesmo efeito biológico que 1 *rad* de radiação beta ou gama. Temos que:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

A outra unidade importante é o *roentgen* (R), definido como a quantidade de radiação que produz $1/3 \times 10^{-9}$ C de carga elétrica (íons positivos ou elétrons) em 1 cm^3 de ar seco nas CNTPs. O *roentgen* é uma medida de exposição à radiação. No Sistema Internacional é dada em *coulomb* por quilograma (C/Kg), sendo:

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$$

As principais fontes de informação a respeito dos efeitos de grandes doses de radiação e do tempo de latência (período entre a exposição à radiação e a detecção de uma doença)

foram obtidas a partir de estudos realizados com os sobreviventes das explosões das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki. Cientistas e médicos também aprenderam muito sobre os efeitos agudos da radiação ionizante com as vítimas do acidente nuclear em Chernobyl. Estudos realizados com pacientes submetidos a tratamentos radioterápicos para fins de diagnóstico e com trabalhadores expostos à radiação, também contribuíram significativamente para a compreensão dos efeitos da radiação no ser humano.

Estima-se que a dose letal de radiação absorvida seja de 4 Gy. Cerca de 50% das pessoas que recebem tal dose no corpo inteiro morrem em um prazo de 30 dias. Pessoas que recebem doses entre 6 Gy e 8 Gy têm pouquíssimas chances de sobreviver, uma vez que sofrem sérios problemas gastrointestinais. Uma dose aguda de 10 Gy causa inflamação dos pulmões e, para doses maiores, os danos atingem os sistemas nervoso e cardiovascular, levando o indivíduo à morte em poucos dias. Os efeitos biológicos da radioexposição aguda em um indivíduo adulto com o corpo todo exposto uniformemente são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Intervalo de dose absorvida por um indivíduo exposto uniformemente à radiação aguda no corpo todo, e o tempo de vida até a morte.

Dose absorvida no corpo todo (Gy)	Principal efeito que leva à morte	Tempo de vida até à morte (dias)
3 – 5	Dano na medula óssea	30 – 60
5 – 15	Dano no trato gastrointestinal	7 - 20
5 – 15	Dano nos pulmões e nos rins	60 - 150
> 15	Dano no sistema nervoso	< 5, depende da dose

Fonte: Okuno e Yoshimura (2010, p. 217).

Okuno e Yoshimura (2010) relatam que são detectados dois tipos de efeitos biológicos provocados pela radiação ionizante: o *estocástico* e a *reação tecidual*. O estocástico afeta uma única célula e pode originar um câncer, enquanto a reação tecidual danifica muitas células e as mata.

As reações teciduais causam a morte celular de um número muito grande de células de um dado órgão ou tecido. Entre os efeitos mais importantes estão a perda da capacidade de reprodução das células, alterações fibróticas e morte celular.

As reações teciduais ainda podem ser classificadas em imediatas ou tardias. As *reações teciduais imediatas* aparecem em questão de horas, dias ou semanas, após um curto intervalo de tempo de exposição a uma alta dose de irradiação. São do tipo inflamatório, como eritema (queimadura) da pele, mucosite (inflamação da mucosa de revestimento do trato gastrointestinal, principalmente da boca) e escamação da pele.

As *reações teciduais tardias* manifestam-se alguns meses ou até anos após a exposição à radiação natural ionizante. Surgem sob diferentes tipos de danos, com diferentes tempos entre o momento da exposição e o surgimento dos primeiros sintomas. É o caso do efeito da radiação em embriões. De acordo com a instituição nipo-americana *Radiation Effects Research Foundation – RERF*¹⁶ (Fundação de Pesquisa de Efeitos da Radiação), estudos realizados com sobreviventes de Hiroshima e Nagasaki, expostos à radiação ainda no útero, revelam que 4,4% apresentaram deficiência mental grave, sendo especialmente pronunciada nas pessoas que se encontravam entre oito e quinze semanas de concepção. Observou-se também, nos grupos sobreviventes que receberam radiação *In Utero*, uma diminuição no quociente de inteligência (QI) em função do aumento da dose de absorção, e redução na altura e no peso entre aqueles que receberam alta dose.

Os efeitos *estocásticos* ou *probabilísticos* aparecem nos indivíduos que recebem doses baixas de radiação crônica por um longo período de tempo, ou nos indivíduos irradiados com doses altas não letais que aparentemente não causaram danos. Os principais efeitos estocásticos são o *cancerígeno* e o *hereditário*. O primeiro incide nas células dos indivíduos que receberam a radiação ionizante, enquanto o segundo incide nas células germinativas, podendo passar para os descendentes da pessoa irradiada.

Segundo Okuno e Yoshimura (2010), os *efeitos estocásticos cancerígenos* são sempre tardios. O período entre a exposição à radiação e a detecção de um câncer pode ser de vários anos. Sabe-se que o tempo de latência médio para a leucemia é de oito anos, e para outros cânceres, de cinco a dez anos. Para a leucemia mieloide aguda, o tempo de latência é de apenas dois anos. De acordo com a fundação RERF (c2007), a leucemia foi o primeiro efeito tardio observado entre sobreviventes das explosões das bombas atômicas. Os primeiros registros foram feitos em Hiroshima pelo médico japonês Takuso Yamawaki, no final da década de 1940; contudo, Okuno (2007) salienta que não há enfermidade específica ligada aos

¹⁶ A RERF, fundada em 1975, estuda o estado de saúde e mortalidade dos sobreviventes e dos descendentes do bombardeio de Hiroshima e Nagasaki. Os dados epidemiológicos e clínicos são coletados desde 1947, quando uma comissão criada pela Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos da América, em colaboração com uma instituição japonesa do Ministério da Saúde e do Bem-Estar, que aderiu ao programa em 1948, deu início aos estudos sobre os efeitos biológicos da radiação e doenças associadas em seres humanos.

efeitos estocásticos. O que se observa é que há uma incidência maior de determinadas doenças, em comparação com a incidência normal. Desse modo, como os efeitos são probabilísticos, eles não aparecem em todas as pessoas irradiadas.

Os efeitos *estocásticos hereditários* resultam de mutações nas células do ovário e dos testículos. Caso os óvulos ou os espermatozoides danificados pela irradiação sejam usados na concepção, os danos são transmitidos para a geração seguinte, ou seja, são carregados hereditariamente.

É importante ressaltar a diferença entre irradiação e contaminação radioativa. Cardoso [200-b] explica que a irradiação é a exposição de um objeto ou de um ser vivo a uma fonte de radiação, sem que haja contato direto com a fonte. Um objeto irradiado não fica radioativo ou contaminado, portanto não é possível armazenar qualquer tipo de radiação; já a contaminação radioativa é caracterizada pela presença de material radioativo em local indesejado, como no organismo por exemplo. Neste caso, o corpo contaminado irradia. Uma pessoa ficará contaminada internamente ao inalar ou ingerir algum radioisótopo. Se tocar diretamente em algum objeto radioativo ou contaminado, a pessoa ficará contaminada externamente.

No acidente radioativo em Goiânia ocorreram as duas situações - irradiação e contaminação. As pessoas que tocaram nos fragmentos de céscio-137 ficaram contaminadas com átomos radioativos. Ao tocarem em outros objetos - como maçanetas de portas, corrimão de escadas e ônibus, ou com um simples aperto de mão -, foram passando as partículas radioativas para outras pessoas, que também se tornaram contaminadas. As pessoas que estiveram perto de indivíduos ou de objetos contaminados foram expostas à irradiação, em maior ou menor grau.

A energia nuclear tem um vasto campo de aplicação para fins pacíficos, todavia, há pontos negativos que geram acirradas discussões. O uso para fins bélicos e o risco de acidentes com reatores nucleares e com equipamentos que utilizam fontes radioativas são preocupantes, uma vez que os efeitos nocivos imediatos e tardios da radiação no homem e no meio ambiente podem ser arrasadores.

4.2. OS REATORES DE FISSÃO E AS USINAS TERMONUCLEARES

A pesquisa científica a respeito dos núcleos atômicos possibilitou a aplicação das reações nucleares e da radioatividade em diversos campos. Os experimentos realizados

levaram a muitas descobertas importantes. Tipler e Llewellyn (2006) relatam que as primeiras informações obtidas, mesmo limitadas pelo uso de radiação emanada de fontes naturais, vieram do bombardeamento de núcleos com vários tipos de partículas. A técnica contribuiu para o estudo de reações nucleares. Depois, máquinas como o primeiro gerador de Van de Graaff, construído em 1931, e o primeiro cíclotron, de 1932, permitiram estudar qualquer nuclídeo e investigar os estados excitados do núcleo. A partir de então, as técnicas de aceleração e de detecção de partículas foram se aperfeiçoando, possibilitando o estudo de reações nucleares e de interação entre partículas elementares.

Entre as milhares de reações nucleares, duas se destacam: a fissão e a fusão. A reação de fissão nuclear é um processo especialmente importante, uma vez que a energia nuclear é usada por vários países para a produção de energia elétrica. O processo para a conversão de energia nuclear em elétrica começa no reator de fissão.

Segundo Terremoto (2004), os reatores de fissão são agrupados em dois tipos principais: os reatores de pesquisa e os reatores de potência. Os reatores de pesquisa¹⁷ são utilizados como fontes de nêutrons para fins diversos, como em experimentos de Física Nuclear básica e para a produção de radioisótopos utilizados em pesquisa, na medicina, agricultura e indústria. Os reatores de potência são projetados para gerar energia elétrica. Há ainda os reatores de propulsão em navios e submarinos.

O foco desta seção é o reator de potência. Em 2011, os reatores de potência que se encontravam em operação no mundo, exceto dois, eram térmicos (HANNUM; MARSH; STANFORD, 2011). Nesses reatores os nêutrons rápidos são desacelerados nas interações com núcleos de peso atômico baixo. A estrutura básica desse tipo de reator é composta pelas seguintes partes: i) varetas de combustível; ii) vaso ou núcleo do reator; iii) contenção: blindagem de aço; iv) edifício do reator: estrutura de concreto. O reator contém três elementos básicos: o combustível nuclear, as barras de controle e o refrigerante usado para transferir do reator para a turbina o calor gerado na fissão. O combustível mais usado é o dióxido de urânio (UO_2) enriquecido com cerca de 2% a 4%; contudo, usa-se também o urânio metálico puro e o dióxido de plutônio (PuO_2) misturado com dióxido de urânio.

Nos reatores que usam o dióxido de urânio enriquecido, o combustível é compactado e transformado em pastilhas resistentes com cerca de 0,9 centímetro de comprimento por 1,1 centímetro de altura. As pastilhas são colocadas no interior de finas varetas, as quais são fechadas para não permitir o escape de produtos resultantes da fissão. As varetas suportam

¹⁷ O primeiro reator nuclear de fissão instalado no Brasil é o reator de pesquisa da Universidade de São Paulo (USP), adquirido dos Estados Unidos da América em 1957 (SAFFIOTI, 1982).

altas temperaturas e são a primeira barreira para impedir a saída de material radioativo. O conjunto de varetas compõe os *elementos combustíveis*.

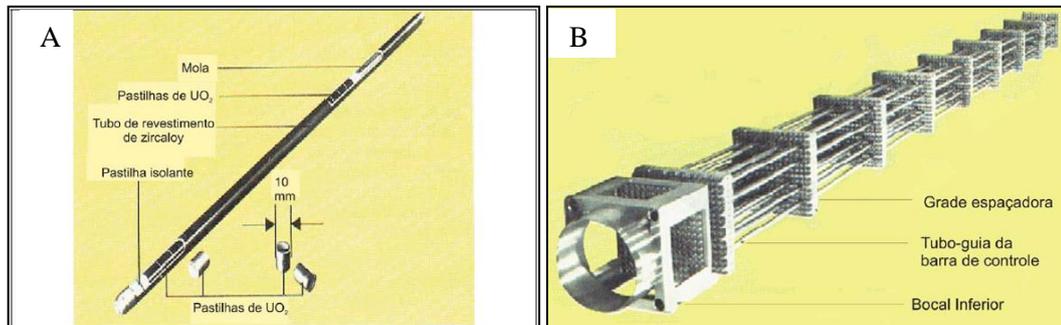


Figura 4: A) Vareta de combustível com pastilhas. B) Elemento combustível de um reator tipo PWR.
Fonte: http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v01_02_caracterizacao.html.

O moderador envolve os elementos combustíveis, permitindo que o reator trabalhe somente com o fluxo necessário de nêutrons para manter a reação em cadeia autossustentada. O moderador torna os nêutrons mais lentos. Os moderadores utilizados são a água, água pesada e grafite.

O controle da reação em cadeia é feito por um conjunto de hastes, comumente chamadas de *barras de controle*, geralmente de cádmio, háfnio ou boro. As barras têm a função de absorver nêutrons excedentes de circulação para, assim, permitir que o reator funcione apenas com um fluxo suficiente de nêutrons e mantenha a taxa de reação desejada. Elas podem se movimentar verticalmente através de tubos-guia no interior dos elementos combustíveis, acionadas por um sistema eletromagnético.

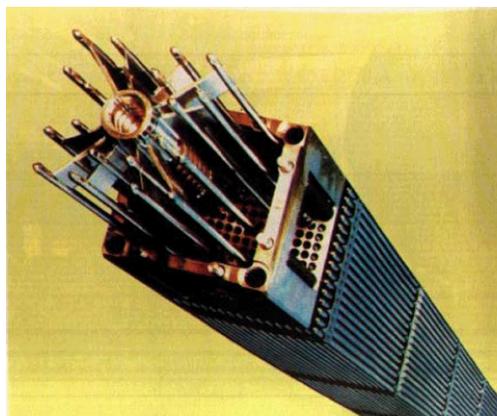


Figura 5: Elemento combustível com barras de controle.
Fonte: http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v01_02_caracterizacao.html.

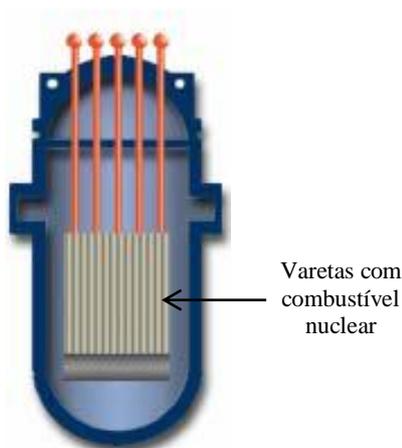
Em resumo, o moderador torna os nêutrons mais lentos, ao passo que as barras de controle absorvem mais nêutrons quando eles são injetados no reator do que quando são dele retirados.

Caso seja necessário o desligamento de um reator em operação, o que pode ser feito é aumentar a absorção de nêutrons por unidade de tempo aprofundando-se as barras de controle no interior da câmara de fissão ou aumentando-se o número de barras. Com esses procedimentos a densidade de nêutrons livres decresce exponencialmente e, conseqüentemente, o número de fissões por unidade de tempo tende a zero. A fissão nuclear cessa, porém o decaimento dos núcleos resultantes das fissões continua, logo é um processo natural e espontâneo que o homem não pode controlar.

Os reatores de potência precisam de uma substância *refrigerante* (líquido ou gás) para absorver o calor liberado na fissão. O refrigerante circula no núcleo do reator e absorve dos elementos combustíveis energia térmica, que é utilizada para gerar vapor. Entre as substâncias mais escolhidas estão a água, a água pesada, o sódio metálico líquido e dióxido de carbono. O gás hélio poderá ser usado em reatores refrigerados a gás, que ainda se encontram em fase de projeto (TERREMOTO, 2004).

Segundo Cardoso (2003), o núcleo do reator é um enorme vaso de aço com paredes bem espessas (cerca de 33,0 cm no reator de Angra I e 23,5 cm no reator de Angra II). Os elementos combustíveis são colocados no interior desse compartimento, que é assentado sobre uma base de concreto com cerca de cinco metros de altura. O vaso de aço é a segunda barreira e tem o objetivo de impedir o escape de radiação (figura 6).

A) Modelo PWR



B) Modelo BWR

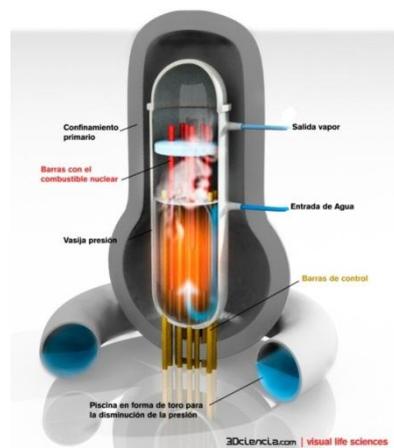


Figura 6: Esquema simplificado do vaso de aço (núcleo) de um reator.

A) Modelo PWR. Fonte: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/PIC.pdf>.

B) Modelo BWR. Fonte: http://www.ediciona.com/portafolio/image/1/1/5/6/bwr-rae-reactor-de-agua-en-ebullicion-vasija-presion-esquema-fukushima_6511.jpg.

A terceira barreira física é uma grande estrutura de aço que abriga o núcleo do reator, denominada contenção. Essa estrutura serve para impedir que os possíveis gases e vapores formados durante a operação escapem para o meio ambiente. Na usina de Fukushima Daiichi, as paredes de contenção dos reatores tinham 3,0 cm de espessura e suportavam de 4,0 a 5,0 bar de pressão (SOARES, 2011).

O edifício do reator é uma estrutura de concreto que envolve a contenção de aço. É o quarto e último obstáculo que dificulta a liberação de material radioativo para o meio externo.

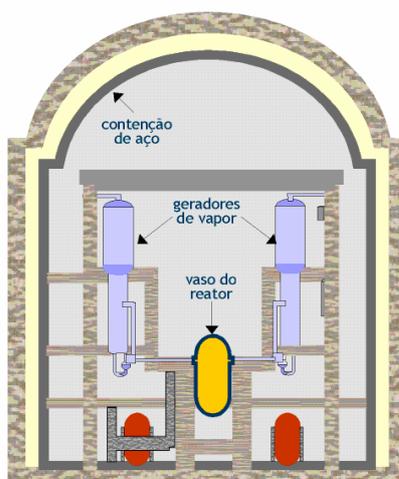


Figura 7: Esquema simplificado do edifício e da contenção de aço do reator (modelo PWR).
Fonte: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/PIC.pdf>.

O reator de potência de uma usina term nuclear faz parte do sistema de geração de vapor de água, denominado circuito primário. A turbina e o gerador compõem o sistema de geração de energia elétrica, chamado de circuito secundário. As centrais nucleares são usinas térmicas, daí o porquê de serem chamadas de term nucleares. Tanto as usinas term nucleares quanto as term eléctricas utilizam fontes de calor para a produção de vapor e de energia elétrica. A diferença está na forma como o vapor é produzido. As fontes de calor em uma term eléctrica podem ser o carvão mineral, o óleo combustível, o gás natural ou outro material usado para queima (por exemplo, há destilarias de álcool e de açúcar que queimam o bagaço da cana para gerar calor nas caldeiras e produzir vapor com o intuito de gerar eletricidade para consumo próprio). Na usina term nuclear, o calor é gerado nas fissões do material radioativo no interior do reator nuclear. Em uma usina term eléctrica, o calor transforma em vapor a água de uma caldeira, ao passo que uma usina term nuclear utiliza um sistema de geração de vapor. Assim, *o reator nuclear e a caldeira têm a mesma função: transformar água em vapor.*

Finalmente, o sistema turbina-gerador transforma em energia elétrica a energia obtida nas etapas anteriores.

Há vários tipos de reatores para produção de energia elétrica em operação no mundo (ANEXO B), porém dois modelos são os mais utilizados: i) reator refrigerado a água fervente (BWR – Boiling Water Reactor); ii) reator refrigerado a água pressurizada (PWR: Pressurized Water Reactor). Em junho de 2011, cerca de 62% (271) dos reatores eram do tipo PWR e 20% (88 reatores) do tipo BWR (BRASIL, 2011c). De acordo com Piore (2011), há um novo projeto de reator a água pressurizada – o AP1000 da Westinghouse, considerado mais seguro pelos especialistas. O AP1000 incorpora sistemas passivos de segurança, cuja finalidade é evitar acidentes do tipo daquele que ocorreu em Fukushima.

Os reatores das unidades Angra I e Angra II da Usina de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, são do tipo PWR (figura 8). No circuito primário desse modelo, a água que circula no núcleo do reator e envolve os elementos combustíveis agrega as funções de moderador e de refrigerante. As fissões nucleares que ocorrem no reator liberam grande quantidade de calor e aquecem a água sob pressão, sem que esta entre em ebulição, e convertem a água do circuito secundário em vapor. O vapor (saturado seco) gira a turbina e o gerador converte a energia mecânica recebida em energia elétrica. Por um terceiro sistema, isolado dos demais, circula água que serve para condensar o vapor de exaustão da turbina. Essa água é captada de uma fonte fria, geralmente o mar. O desligamento do reator é realizado através do aprofundamento das barras de controle, que caem por gravidade. Segundo Piore (2011), a radioatividade está limitada ao circuito pressurizado, porém, no caso de falta de eletricidade as bombas não conseguem enviar ao reator a água fria necessária para a refrigeração, aumentando o risco de derretimento da blindagem de aço do núcleo.

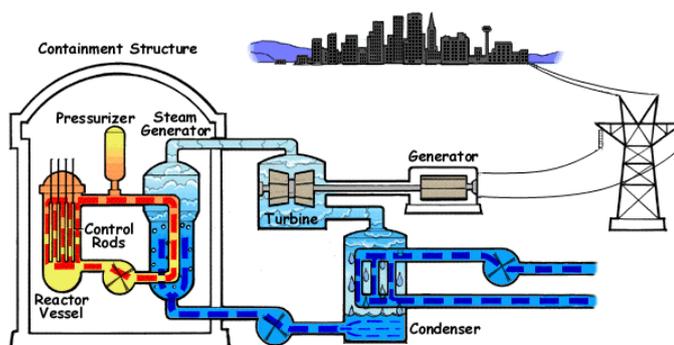


Figura 8: Representação esquemática do reator a água pressurizada tipo PWR.
Fonte: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/PressurizedWaterReactor.gif/420px-PressurizedWaterReactor.gif>.

Os reatores da usina termonuclear de Fukushima Daiichi são do tipo BWR (figura 9). De acordo com Terremoto (2004), nesse modelo o reator também é moderado e refrigerado a água. O calor produzido pelas fissões nos elementos combustíveis do núcleo faz a água ferver até se transformar no vapor que, por sua vez, gira a turbina, cuja energia é transferida ao gerador e convertida finalmente em energia elétrica. Esse sistema elimina a necessidade do gerador de vapor (parte integrante do sistema PWR), que tem a finalidade de produzir vapor no circuito secundário, o que permite ao reator operar sob pressão mais baixa em comparação ao modelo PWR. Um sistema isolado dos demais capta água do mar para realizar a condensação dos vapores. Caso seja necessário o desligamento do reator, as barras de controle sobem acionadas por um sistema elétrico. Conforme mencionamos anteriormente, o núcleo é protegido com um envoltório de aço e concreto; contudo, se por algum motivo a água das bombas de refrigeração do reator for perdida por alguns dias, o hidrogênio gerado por reações de vapor pode explodir dentro da blindagem de concreto, rompendo-a e liberando o combustível radioativo para o meio ambiente (PIORE, 2011). Em Fukushima, o hidrogênio liberado provocou a explosão da contenção de aço e da estrutura de concreto que protegia o núcleo dos reatores 1 e 3, porém os vasos de aço dos reatores foram preservados.

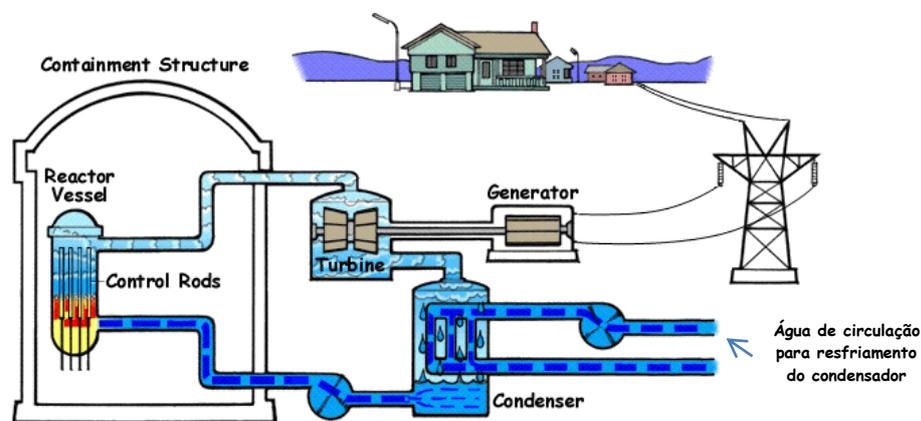


Figura 9: Esquema simplificado de um reator a água fervente (BWR).
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/BoilingWaterReactor.gif>.

Um reator nuclear não explode como uma bomba atômica, por duas razões. A primeira é que não há material físsil (massa crítica) em quantidade suficiente para permitir que seja desencadeada a reação em cadeia com rapidez e provocar uma explosão (o urânio de um reator contém de 1 a 4% de urânio-235, enquanto uma bomba atômica precisa conter 90% de urânio-235); e a segunda é que as barras de controle absorvem os nêutrons em excesso,

controlando assim a reação em cadeia. Em outras palavras, um reator é uma bomba atômica controlada.

4.2.1. Afinal, o que é urânio enriquecido? O ciclo do combustível nuclear e a destinação dos rejeitos radioativos

Conforme já mencionamos, a quantidade de urânio-235 na natureza é muito pequena, cerca de 0,7% do urânio natural. Para exemplificar de modo mais claro, de cada 1.000 átomos de urânio, sete são de urânio-235 (físsil) e 993 são de urânio-238 (não físsil), sendo desprezível a quantidade dos demais isótopos.

Para que ocorra a fissão do urânio-235, é necessário que exista uma quantidade mínima de massa para sustentar a reação em cadeia controlada. Desse modo, torna-se necessário elevar a quantidade de urânio-235 encontrado na natureza, procedimento que é conhecido como *enriquecimento do urânio*. Para isso, o urânio natural é tratado industrialmente. Várias técnicas foram desenvolvidas, entre elas a de difusão gasosa, a de centrifugação em escala industrial, a de jato centrífugo em escala de demonstração industrial e a de *laser*, ainda em fase de pesquisa (HEWITT, 2011).

O processo de enriquecimento de urânio percorre um longo caminho, conhecido como ciclo do combustível. O urânio natural extraído de formações rochosas é separado dos outros minérios e transformado em um pó de cor amarelada (U_3O_8), conhecido como *yellowcake* (são necessários 8 Kg de *yellowcake* para se obter 1 Kg do produto final). O pó é misturado com flúor para que seja convertido em hexafluoreto de urânio (UF_6), que, acima de 56 °C, apresenta-se na forma gasosa. No processo com emprego de centrífugas de gás, o hexafluoreto de urânio é colocado no interior de um cilindro, que gira com velocidade da ordem de 1.500 km/h, para que seja realizado o enriquecimento do gás. Como o urânio-238 é mais pesado, suas moléculas gravitam para fora do eixo de rotação e concentram-se perto da parede do cilindro, enquanto as moléculas de urânio-235 tendem a se concentrar na parede próxima ao eixo central. O gás de urânio é extraído da parte central do cilindro, com uma concentração maior de urânio-235 (acima de 0,7%). A etapa seguinte é a de reconversão, isto é, o gás de urânio enriquecido (UF_6) é transformado em pó - o dióxido de urânio (UO_2) - e, depois, compactado em forma de pastilhas cilíndricas, as quais são introduzidas nas varetas dos elementos combustíveis. Resumidamente, temos as seguintes etapas para a composição

do combustível nuclear: i) extração do minério do solo; ii) beneficiamento para separar o urânio de outros minérios; iii) conversão do produto do beneficiamento (*yellowcake*) em gás; iv) enriquecimento do gás; v) reconversão do gás enriquecido em pó; vi) transformação do pó em pastilhas resistentes; vi) composição dos elementos combustíveis do núcleo do reator.

Os reatores de potência atuais usam como combustível principalmente o urânio-238, enriquecido com cerca de 2% a 4% de urânio-235. Em reatores de pesquisa e de propulsão, o processo de enriquecimento pode variar bastante.

De acordo com Hannum, Marsh e Stanford, (2011), o urânio enriquecido usado em um reator tem vida útil de cerca de três anos. Após esse período, os elementos combustíveis são removidos, em virtude do esgotamento do urânio-235, e substituídos por outros; contudo, o combustível exaurido encontra-se irradiado, portanto contém átomos potencialmente fissionáveis, como o restante de urânio-235 e de urânio-238, e produtos de fissão como o plutônio-239 e o estrôncio-90. Sabe-se que o urânio-238 não é físsil, no entanto é “fissionável”, logo pode se quebrar ao ser atingido por um nêutron rápido. O urânio-238 também é considerado fértil porque, ao absorver um nêutron, transforma-se em plutônio-239, que é físsil e pode sustentar uma reação em cadeia (Cf. Apêndice A).

Em um reator, apenas um vigésimo dos núcleos potencialmente fissionáveis é efetivamente usado na “queima”, portanto, 95% do material gasto ainda mantém a energia original. Isso significa que o material removido de um reator no fim de sua vida útil ainda tem potencial para gerar energia. Ainda deve-se levar em conta que, no processo de enriquecimento, apenas um décimo do minério de urânio extraído do solo é convertido em combustível, o que resulta em menos de um centésimo da energia total do minério usada efetivamente na geração de energia elétrica em uma usina.

O material resultante das sobras deixadas pelo processo de enriquecimento do urânio e o combustível gasto nos reatores não podem ser simplesmente descartados. O ciclo do combustível é, então, completado com a destinação desse material irradiado. Existem duas estratégias adotadas. A primeira envolve o reprocessamento ou a armazenagem para futuro reprocessamento; na segunda, o material usado é considerado rejeito radioativo e, neste caso, é armazenado preliminarmente para futura destinação definitiva.

O combustível exaurido é composto por três classes de materiais. A primeira consiste nos produtos de fissão de elementos mais leves, resultantes das fissões de núcleos mais pesados. A mistura desses elementos corresponde a 5% do combustível usado e é considerada rejeito radioativo, lixo propriamente dito. É altamente radioativa nos primeiros anos e se torna

inofensiva somente após 300 anos, quando a radioatividade dos isótopos declina por um fator de mil. A segunda classe é composta por urânio muito semelhante ao urânio natural (com 0,7% de urânio-235), correspondendo a 94% do combustível usado. Esse material não é fissionável, mas é levemente radioativo e, se separado dos outros produtos do combustível gasto, pode ser armazenado para reprocessamento futuro. A terceira classe, a mais preocupante, são os elementos transurânicos - núcleos mais pesados do que o urânio -; é composta principalmente por isótopos de plutônio e amerício. Essa parte, embora corresponda a apenas 1% do material usado, é o principal problema do combustível usado, pois as meias-vidas dos radioisótopos são de dezenas de milhares de anos. (HANNUM; MARSH; STANFORD, 2011).

Alguns países optam pelo reprocessamento do material. O combustível resultante do reprocessamento do urânio residual e do plutônio é um óxido misto conhecido como MOx, utilizado no abastecimento de reatores chamados de regeneradores rápidos. O MOx contém cerca de 25% de óxido de plutônio (PuO_2) misturado ao óxido de urânio (UO_2). Os reatores regeneradores rápidos são adequados para proporcionar a regeneração do combustível nuclear a partir do bombardeamento por nêutrons rápidos. Neste caso, núcleos férteis de urânio-238 presentes na mistura vão se transformando em núcleos físséis de plutônio-239 pela ação dos nêutrons. Esse processo de conversão visa produzir mais combustível físsil do que o que é consumido.

Um ponto negativo do reprocessamento de combustível usado diz respeito à proliferação de armas nucleares, como a bomba atômica. De acordo com Hannum, Marsh e Stanford, (2011), para a produção de artefatos nucleares precisa-se de plutônio quimicamente puro e com grande quantidade do isótopo 239. O plutônio dos rejeitos dos reatores contém outros isótopos, o que dificulta a construção de bombas. Embora o processo de purificação seja caro, não é inconcebível, o que torna possível a proliferação de armas nucleares. Os Estados Unidos da América baniram o reprocessamento do plutônio em 1977, para evitar que fosse usado em bombas atômicas. Já nações como a França, a Rússia, o Reino Unido e o Japão não seguiram o exemplo dos norte-americanos e fazem uso do reprocessamento de plutônio para abastecimento de usinas em vários países.

4.2.2. Usina term nuclear: opção competitiva, os riscos e as perspectivas futuras

As principais opções de usinas para a produção de energia elétrica são a hidrelétrica, a nuclear, a eólica, a solar, a de carvão mineral e a de gás natural. Dessas, são consideradas fontes poluentes a de carvão e a de gás natural, uma vez que emitem na atmosfera os gases de efeito estufa. As fontes de energia limpa são a eólica, a solar e a nuclear.

Segundo Wald (2011), atualmente a fonte de energia limpa que mais cresce é a eólica; porém é menos confiável, pois, como o vento não é controlável, os geradores funcionam apenas quando a natureza o permite. A energia solar é mais previsível. Grandes células voltaicas estão sendo construídas para converter a luz solar em energia elétrica, com a vantagem de dispensarem novas tecnologias de distribuição em centros congestionados e a desvantagem de não funcionarem no escuro. As instalações solares utilizam espelhos curvos para focalizar a luz solar em tubulações para aquecer a água, que se transforma em vapor e faz a turbina girar. Com alguns aperfeiçoamentos, o calor pode ser absorvido e a energia armazenada, mesmo em períodos nublados e nas horas logo após o pôr do sol. Embora os novos projetos de usinas eólicas e termossolares sejam mais eficientes quanto aos custos de construção, a desvantagem é que são construídas em desertos ou em regiões muito distantes dos centros urbanos, o que encarece a instalação de longas linhas de transmissão.

A opção nuclear surgiu após a Segunda Guerra Mundial. De acordo com Terremoto (2004), o primeiro reator de potência do mundo entrou em operação em Arco, nos Estados Unidos, em dezembro de 1951, com capacidade de gerar 0,2 MW de potência. Em junho de 1954, a antiga União Soviética anunciou o funcionamento da primeira usina nuclear do planeta, instalada na cidade de Obninsk, com capacidade de fornecer 5 MW de potência para as fazendas, vilas e fábricas da região no entorno. O período de 1970-1980 foi considerado a era do ouro da energia nuclear. A utilização dessa fonte de energia foi se expandindo gradualmente, de forma que, no final do ano de 1973, correspondia a 3,3% do total da energia elétrica gerada no mundo e, no ano de 2000, já equivalia a 16,9% da produção mundial.

Conforme relata Goldemberg (2011), após 1979 a expansão da tecnologia nuclear ficou praticamente paralisada após o derretimento parcial do núcleo do reator da usina de Three Mile Island, na Pensilvânia, Estados Unidos, em março daquele ano. O desastre de Chernobyl, ocorrido em 1986 na Ucrânia, contribuiu para aumentar o temor das pessoas e a reação da sociedade contra tal opção energética, o que provocou a estagnação da expansão nuclear. Entre 1980 e 2000, menos do que três reatores eram instalados por ano no mundo, ao passo que no período de 1970/80 eram trinta por ano.

A forte oposição à energia nuclear, principalmente por parte dos ambientalistas, em virtude dos acidentes de Three Mile Island e Chernobyl, foi acentuada pelo fato de que o processo de fissão nuclear do núcleo de urânio para geração de energia elétrica é o mesmo para a produção da bomba atômica. Assim, o país que domina a tecnologia está, em tese, apto para construir armas nucleares.

Por outro lado, com as mudanças climáticas ocorridas no planeta nas últimas décadas as usinas nucleares passaram “de ameaça ambiental a potencial fonte de energia livre de carbono” (PIORE, 2011, p. 7). A energia nuclear é considerada uma fonte limpa, uma vez que os reatores não emitem gases de efeito estufa, além de diminuir a dependência de combustíveis fósseis. A oposição a essa fonte energética tornou-se, então, mais branda. O aquecimento global fez renascer a opção nuclear como uma das soluções para reduzir as emissões de carbono na atmosfera, uma vez que cerca de 7 bilhões de toneladas de carbono precisam deixar de ser emitidos anualmente até 2050 (DEUTCH; MONIZ, 2011). Em decorrência desse cenário, após o ano de 2000 a energia nuclear voltou a ser competitiva, passando a figurar como uma das mais importantes tecnologias para a geração de eletricidade. De acordo com dados da Eletrobrás/Eletronuclear (BRASIL, 2011c), em julho de 2011 operavam no mundo 440 reatores de potência e mais 65 se encontravam em construção.

Outra vantagem apontada pelos defensores da energia nuclear é a taxa de geração de calor quando comparada às demais usinas térmicas, pois produz grande quantidade de energia elétrica consumindo pouco combustível. Por exemplo, precisa-se de 1200 kg de carvão, ou de 700 kg de óleo combustível, para gerar a mesma quantidade de energia que 10 g de urânio-235 (CARDOSO, 2003), ou então, 1 Kg de urânio-235 armazena mais energia do que 30 vagões de trem carregados de carvão mineral (Hewitt, 2011). Se uma usina nuclear funcionar durante anos, perto de sua capacidade máxima, o custo real operacional é cerca de quatro vezes mais baixo do que o de uma usina de carvão e dez vezes mais baixo do que o de uma usina de gás natural (PIORE, 2011). Ademais, além de produzir energia em larga escala e a preço razoável, a planta se concentra em uma pequena área.

Citamos algumas vantagens do uso da energia nuclear para geração de eletricidade, mas há também desvantagens - como a destinação dos resíduos radioativos produzidos, o custo de construção e o risco de acidentes -.

O que fazer com os rejeitos radioativos é um ponto polêmico da tecnologia nuclear. O combustível utilizado em um reator tem vida útil de cerca de três anos. Após esse tempo, o material é removido em razão do esgotamento do urânio-235. Não obstante, segundo

Gonçalves (2011), o combustível usado ainda comporta cerca de 40% de sua capacidade energética, ou seja, continua radioativo por centenas de milhares de anos. Esse material, que ainda pode ser reprocessado e reutilizado, deve ser armazenado em depósitos seguros para futuro reprocessamento, de modo a evitar riscos de contaminação para a população e para o meio ambiente. Outra opção é armazenar o combustível usado em repositórios preliminares até a sua deposição final. O problema é que não existem ainda, em nenhum país do mundo, depósitos definitivos para o armazenamento de rejeitos radioativos ou soluções válidas para milhões de anos. Existem, no momento, apenas soluções gerenciáveis.

Wald (2011) aponta outro problema: a complexa desmontagem de uma usina nuclear no fim de sua vida útil. Isso acarreta a necessidade do descomissionamento do terreno, ou seja, da transferência do material radioativo de um local para outro, de modo a recuperar as condições de limpeza e do verde da área. As ações envolvem a descontaminação e desmontagem dos componentes, a demolição dos edifícios, a remediação de qualquer contaminação de solo e a remoção de todos os resíduos. Até 2011 existiam 133 usinas no mundo que foram fechadas permanentemente, e destas, apenas 10% foram descomissionadas completamente (BRASIL, 2011c).

Embora a operação de uma usina nuclear seja barata, o custo de sua construção é muito alto, além de o tempo para a edificação ser demasiadamente longo. Segundo Piore (2011), hoje o custo é quase o dobro por megawatt quando comparado a uma usina de carvão, e quase cinco vezes mais do que uma usina de gás natural; contudo, tecnologias mais modernas prometem tornar sua construção mais barata. Afirma Wald (2011, p. 12):

As usinas nucleares atuais foram construídas para funcionar 60% do tempo e durar 40 anos. As usinas futuras deverão funcionar 90% do tempo durante 60 anos ou mais. Considerando as incertezas na demanda futura, regulamentação sobre as emissões de carbono e os preços dos combustíveis fósseis, explorar a energia nuclear continua sendo uma opção comercialmente válida. Usinas nucleares poderão ser construídas em série, idênticas, como kits de móveis pré-fabricados. A construção em massa é mais rápida e mais barata.

O risco de acidentes provocados por falha humana na operação dos equipamentos de uma usina nuclear é uma preocupação constante. Foi o que aconteceu em Three Mile Island, em que um erro de operação causou o derretimento parcial do núcleo do reator. Apesar de não ter provocado consequências significativas, foi o suficiente para desacelerar a expansão da

tecnologia nuclear. Por outro lado, o evento levou os governos que fazem uso da tecnologia nuclear a aumentar o rigor na fiscalização dos reatores, o que produziu mais custos dos sistemas de segurança.

Em Chernobyl o reator estava em procedimentos de teste quando os operadores perderam o controle do reator. Houve uma explosão catastrófica seguida de incêndio, lançando na atmosfera de toda a Europa grande quantidade de material radioativo. O impacto real da radiação sobre as pessoas e meio ambiente e o número preciso de mortes ainda não são conhecidos, em razão de informações desencontradas.

Vinte e cinco anos se passaram e o acidente de Chernobyl parecia esquecido. O mundo passava por um renascimento nuclear quando o acidente radioativo de Fukushima, ocorrido no Japão em março de 2011, reascendeu o temor nuclear (GOLDEMBERG, 2011). Desta vez, o acidente com os reatores não foi provocado por falha humana, mas por um evento da natureza – um imenso *tsunami*.

Os novos modelos de reatores nucleares prometem incorporar sistemas “passivos” de segurança, com a finalidade de evitar acidentes como o de Fukushima; todavia, Piore (2011) afirma que, apesar de todo o planejamento de engenheiros com os itens de segurança e dispositivos de resfriamento dos reatores,

(...) a energia nuclear sempre será vulnerável a eventos cisne negro, como são conhecidos em inglês os incidentes altamente indesejáveis e de grande repercussão. Um acontecimento raro é difícil de prever, oneroso de planejar e fácil de camuflar nas estatísticas. Principalmente um que nunca aconteceu. Se um evento tiver uma probabilidade de acontecer uma vez em 10 mil anos, por que teria de acontecer exatamente amanhã? (PIORE, 2011, p. 8).

O autor comenta que as potenciais ameaças do tipo *cisne negro* são diversas. Há reatores que estão localizados em regiões com falhas geológicas ou em áreas de grande probabilidade de ocorrência de *tsunamis* (caso de Fukushima), furacões e tempestades. Há ainda o temor de ataques de aviões pilotados por terroristas.

O acidente radioativo do Japão foi um evento *cisne negro*, sem dúvida. O *tsunami*, que se seguiu a um terremoto de dimensões devastadoras, danificou significativamente as instalações dos reatores da central de Fukushima Daiichi. Com a inundação houve perda de energia elétrica, o que tornou inoperante o sistema de refrigeração dos reatores – problema não previsto no planejamento da planta. Em consequência, ocorreram explosões nas

contenções secundárias em virtude da formação de hidrogênio no interior das estruturas, liberando grande quantidade de iodo-131 para o ambiente externo. Alguns funcionários foram expostos à radiação e houve a necessidade de evacuar a população do entorno para prevenir a contaminação radioativa.

Antes do tsunami de 2011, operavam 54 reatores nucleares no Japão, fornecendo cerca de um terço de toda a energia elétrica do país, porém a meta do governo era atingir 50%. Após o acidente, quatro reatores da unidade de Fukushima Daiichi foram definitivamente fechados em 20 de maio de 2011. De acordo com o jornal O Estado de São Paulo (15 set. 2012, Caderno Vida, p. A26), em 14 de setembro de 2012 o governo japonês anunciou que eliminará por completo, até 2030, as usinas term nucleares, as quais serão substituídas por fontes de energia renovável, como a eólica e a solar. A virada radical na política energética, com apoio de 70% da população, foi motivada pelas manifestações populares, que exigiram o fim das usinas term nucleares, e pelas audiências públicas contrárias à retomada da produção nuclear. A população mostrou ter uma participação ativa nas decisões públicas que envolvem o bem-estar do homem e a preservação do meio ambiente. Além do mais, os japoneses, que conhecem bem o poder destrutivo da radiação nuclear, levaram em conta os registros históricos do país, com altíssimo risco de ocorrência de terremotos e *tsunamis*.

As lições de Fukushima levaram os governos a revisar suas centrais nucleares e a elaborar planos para melhorar e aumentar continuamente a segurança dos reatores em operação e/ou em fase de projeto, como também a substituir os reatores antigos, quer por modelos mais seguros e eficientes, quer por outras fontes energéticas limpas. Os planos de verificação e revisão de segurança incluem a capacidade de enfrentamento de desastres naturais (terremotos, *tsunamis*, furacões, tornados, enchentes, etc.), eventos provocados por falha humana, explosões, incêndios, quedas de aviões e até ataques terroristas. Não é possível construir reatores imunes a qualquer tipo de ameaça, mas é possível melhorar os novos projetos construindo modelos mais seguros, mais compactos, mais simplificados, mais baratos e com ciclo termodinâmico mais eficiente. Além das falhas na segurança na operação dos reatores e do risco de desastres, os governos que fazem uso da energia nuclear terão que superar questões que ainda não estão bem resolvidas, como o transporte e o armazenamento dos rejeitos radioativos, os custos e o tempo de construção de usinas e, principalmente, a desconfiança e o temor da população.

Embora o evento de Fukushima tenha despertado certo temor e rejeição às usinas nucleares, parece que isso não ocorreu em todas as partes do planeta. Conforme mostram

dados da Eletrobrás-Eletronuclear (BRASIL, 2011c) sobre o panorama da energia nuclear no mundo em julho de 2011, não houve muitas alterações no que se refere às expectativas futuras. Com exceção da Alemanha, que, pós Fukushima, comprometeu-se a desligar todos os reatores até 2022, e do Japão, os demais países que geravam energia elétrica por meio de fontes nucleares praticamente mantiveram seus programas. Para citar um exemplo, nos Estados Unidos, o acidente não afetou muito a população, o que pode ser confirmado pelas pesquisas de opinião entre os residentes próximos às centrais nucleares, apontando que 80% deles aprovam o programa nuclear.

No Brasil, em 2010 teve início a construção da unidade de Angra 3, sem alterações no programa pós-Fukushima. É interessante citar a Itália, único país do bloco G8 – grupo dos países mais ricos do mundo – que não opera usinas nucleares desde 1990, mas gera energia nuclear em solo da Eslováquia e compra eletricidade nuclear da França. O governo italiano encerrou definitivamente as atividades de duas usinas em virtude do esgotamento da vida útil e de duas por decisão da população. Em 2009 o Senado aprovou um novo programa nuclear, mas foi repudiado pela população através de um plebiscito em junho de 2011, após o acidente de Fukushima. A Itália está localizada em uma região sujeita a terremotos de grande magnitude, o que contribuiu para a decisão da população.

Ainda de acordo com o documento da Eletrobrás-Eletronuclear (BRASIL, 2011c), em julho de 2011 cerca de 65 países que não dominam a tecnologia nuclear expressavam interesse por essa questão, como também as potências em expansão mostraram interesse em aumentar o número de usinas em seu território. Conforme previsão da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), até 2030 haverá um aumento mundial da capacidade nuclear instalada superior ao dobro da capacidade atual:

Mesmo após o acidente da central de Fukushima no Japão, muitos governos consideram a ampliação internacional da energia nuclear uma opção à mudança climática e uma alternativa às oscilações do preço dos produtos energéticos, além de ser uma proteção à incerteza sobre o suprimento dos combustíveis fósseis, mas esta expansão da energia nuclear em todo o mundo requer que os governos atuem com responsabilidade e critérios de segurança rígidos nessa empreitada (BRASIL, 2011c, p. 9).

No entanto, há opiniões mais cautelosas com respeito a esse cenário. Segundo Goldemberg (2011), muitos países que fazem uso da tecnologia nuclear passaram a reavaliar

as decisões de expansão de seus parques após março de 2011, uma mudança naturalmente motivada por uma série de considerações. De acordo com o autor, o acidente de Fukushima, tal como o de Chernobyl, está levando a uma séria reavaliação do papel que a energia nuclear desempenhará no mundo futuro.

De qualquer modo, o futuro energético deve ser pensado com cautela, de forma que as opções energéticas sejam fontes de energia limpa, economicamente viáveis e seguras para a população e o meio ambiente. A participação da sociedade nas decisões públicas com relação a esse tema é fundamental.

4.3. RADIAÇÕES NUCLEARES E SUAS APLICAÇÕES

As aplicações das reações nucleares e da radioatividade não se restringem à geração de energia elétrica. Desde a descoberta da radioatividade os cientistas constataram inúmeros benefícios em sua aplicação na medicina, na indústria, na agricultura, em pesquisas científicas e no ambiente. Os radioisótopos têm a propriedade de emitir radiação que, por sua vez, pode atravessar a matéria ou ser absorvida por ela. Esta propriedade abre um leque muito grande de aplicações em benefício da melhoria da qualidade de vida do homem. Nesta seção, destacamos algumas delas.

Nas diversas áreas os traçadores radioativos são extremamente úteis. Segundo Cardoso [200-a], os traçadores são radioisótopos usados em quantidades pequeníssimas, e quando injetados em um organismo ou substância, podem ser acompanhados por detectores de radiação, o que permite traçar o seu percurso em um mapa. Por exemplo, para se estudar o comportamento de abelhas e formigas, os insetos ingerem uma solução com um traçador e passam a emitir radiação. O trajeto é acompanhado por um detector que mapeia o local do formigueiro ou, no caso das abelhas, o local onde procuram as flores de sua preferência.

Na agricultura, os traçadores são usados para acompanhar o metabolismo das plantas e estudar o que elas precisam para crescer, o que as raízes e folhas absorvem e onde um elemento químico fica retido. Por exemplo, para determinar a quantidade adequada de fertilizante que os agricultores podem usar nas lavouras, os pesquisadores adicionam uma pequena quantidade de material radioativo ao fertilizante. Depois a mistura é administrada a algum tipo de planta. A quantidade de fertilizante absorvida pela planta é facilmente medida por detectores de radiação. Com essa técnica os pesquisadores conseguem descobrir os

caminhos seguidos pela mistura e determinar a quantidade ideal de fertilizante para aquela planta (HEWITT, 2011).

Segundo Gonçalves e Almeida (2005), a radiação nuclear também é usada para eliminar pragas na lavoura aplicando-se a técnica do “macho estéril”. Para isso são produzidos em laboratório machos estéreis que depois são introduzidos nas plantações, misturando-se e competindo com os machos normais. Como os insetos têm vida curta, consegue-se afetar a reprodução das pragas sucessivamente e reduzir significativamente sua população. De acordo com os autores, essa técnica está sendo aplicada no Nordeste do Brasil para combater as pragas das plantações de manga e de uva.

A indústria brasileira é responsável pela maior parte de licenças nucleares. Os radioisótopos mais usados são cobalto-60, o irídio-192, o cézio-137 e o amerício-241. A técnica de radiação gama de alta intensidade é muito empregada na medição de espessura de materiais, de vazão de líquidos, no controle de qualidade de junções de peças metálicas ou para verificar se há rachaduras no corpo de peças metálicas. Por exemplo, na indústria de papel a medição com radiação é aplicada para que todas as folhas fiquem com a mesma espessura e, assim, atendam ao padrão mundial de qualidade. As empresas de aviação constantemente empregam a técnica para verificar se há fadiga das peças metálicas e soldas sujeitas a maior esforço, como as asas e turbinas, por exemplo (CARDOSO, 200-a; GONÇALVES; ALMEIDA, 2005).

Gonçalves e Almeida acrescentam que a indústria emprega os traçadores radioativos para detectar possíveis vazamentos ou mau funcionamento no sistema hidráulico da indústria química. Na indústria petroleira, fontes de nêutrons são usadas para o estudo do perfil do solo. Outras fontes de partículas nucleares podem ajudar a distinguir a quantidade de água, de óleo e de gás presente no material extraído.

No campo da indústria alimentícia, uma aplicação bastante importante é a irradiação de alimentos. Todos os dias milhões de pessoas adoecem em decorrência da ingestão de alimentos contaminados. Muitas dessas pessoas - em sua maioria, crianças e idosos -, morrem em consequência de doenças contraídas pela ingestão de alimentos infectados. Para combater esse problema, a indústria passou a empregar o método da irradiação de alimentos com fonte radioativa, sendo o cobalto-60 o radioisótopo mais utilizado. Hewitt (2011) comenta que a técnica, testada durante 40 anos no século XX, utiliza a radiação gama de alta intensidade para eliminar micro-organismos como a *Salmonella typhimurium*, os micróbios ou parasitas presentes nos alimentos. Com isso, a maior parte das bactérias capazes de causar doenças é

eliminada, diminuindo os riscos de as pessoas serem infectadas. A irradiação também mata os insetos que se encontrem nos grãos e cereais. Em pequenas doses, a radiação impede a brota da batata, da cebola, do alho, etc. Quanto às frutas, a técnica retarda o amadurecimento e aumenta significativamente a vida útil desses produtos. Doses de 0,1 Gy a 1,0 Gy matam os micróbios e parasitas da carne de porco. Em doses maiores (de 1 a 10 KGy), a radiação reduz o número de micro-organismos patogênicos nos frutos do mar, peixes, frangos e morangos. Comparada ao armazenamento de alimentos em conserva ou a refrigeração, a irradiação acarreta menos efeito sobre o sabor e a nutrição.

De acordo com Hewitt (2011), no processo nenhum alimento torna-se radioativo, pois os raios gama não possuem energia suficiente para arrancar nêutrons do núcleo. A irradiação de alimentos é adotada por 37 países e tem sido endossada por grandes sociedades científicas, como a Organização Mundial da Saúde das Nações Unidas, a *U. S. Food and Drug Administration* e a *American Medical Association*; contudo, há controvérsias quanto ao uso dessa técnica. Hewitt avalia que há certa recusa das pessoas quando há envolvimento da energia nuclear. O autor questiona: “A escolha não deveria ser feita entre o número de pessoas que *poderiam* ser prejudicadas pelos alimentos irradiados, contra aqueles que de fato *realmente morrem* porque os alimentos não foram irradiados?” (HEWITT, 2011, p. 599, grifo do autor).

A esterilização de materiais cirúrgicos e hospitalares é outra aplicação muito importante, uma vez que o processo destrói os micro-organismos nocivos neles presentes. A indústria farmacêutica utiliza fontes radioativas para esterilizar seringas, luvas cirúrgicas, gazes, algodão e outros materiais descartáveis, e também de suturas. O processo de irradiação é vantajoso nessa área, uma vez que os métodos convencionais, que empregam altas temperaturas, destroem ou deformam os materiais, inutilizando-os.

Okuno e Yoshimura (2010) relatam que na esterilização de materiais hospitalares são usadas fontes emissoras de fótons com energia elevada, como o cobalto-60, ou aceleradores lineares com feixes de fótons. O processo é realizado com os produtos já embalados em caixas de papelão, para se evitar que sejam manipulados após a esterilização. As caixas são colocadas em esteiras rolantes que rodeiam a fonte radioativa, de modo que suas diversas faces sejam submetidas o mais uniformemente possível à irradiação, por raios gama ou raios X.

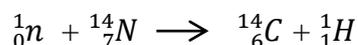
A preocupação com o meio ambiente levou à aplicação de técnicas nucleares nessa área. O uso de traçadores radioativos permite mapear a movimentação de águas subterrâneas,

o tempo de recarga de aquíferos, o manejo de águas, fugas em barragens, dispersão em efluentes e sedimentos (CNEN, 2011). A esterilização de lixo e dejetos orgânicos, particularmente do lixo hospitalar e de esgotos, de modo a garantir que não contenham micro-organismos nocivos, também está sendo realizada por meio de radiação nuclear (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005).

Tipler e Llewellyn (2006) comentam que a técnica de análise por ativação de nêutrons é bastante usada na detecção de poluentes no ar, no controle de qualidade de dispositivos semicondutores e para a autenticação de obras de arte.

Outra aplicação bastante importante é a datação com carbono-14 por meio de radionuclídeos. A técnica é usada por arqueólogos para determinar a idade de amostras antigas que contêm carbono, como manuscritos, ossos de animais fósseis, pintura rupestre, ferramentas de madeira e esqueletos. Segundo Tipler e Llewellyn (2006), a datação com carbono-14 foi desenvolvida pelo químico americano Willard Frank Libby, que pelo trabalho ganhou o Prêmio Nobel de Química em 1960.

Cabe aqui uma pergunta: como o carbono foi acumulado nas amostras arqueológicas? Hewitt (2011) explica que o constante bombardeamento da atmosfera terrestre por raios cósmicos produz muitas transmutações de átomos, resultando em muitos prótons e nêutrons que são espalhados na atmosfera superior. A colisão da maior parte dos prótons com átomos da atmosfera acaba arrancando elétrons desses átomos, possibilitando a formação de hidrogênio. Os nêutrons, como não têm carga elétrica, continuam em movimento e colidem com átomos das camadas inferiores da atmosfera, que são mais densas. Quando um nêutron é capturado por um átomo de nitrogênio-14, um próton é emitido e o nitrogênio-14 se transforma em um isótopo de carbono-14, conforme mostra a equação abaixo:



Desse modo, o carbono-14 é produzido continuamente na atmosfera pela reação demonstrada. Representa menos de um milionésimo de 1% do carbono na atmosfera, possui oito nêutrons e é radioativo. É um emissor β^- e decai novamente para nitrogênio-14, com meia-vida de 5.730 anos. O isótopo mais comum é o carbono-12, que possui seis nêutrons e não é radioativo. Tanto o carbono-14 quanto o carbono-12 combinam-se com o oxigênio e formam o dióxido de carbono (CO_2), que é absorvido pelas plantas. Dessa maneira, o carbono-14 e o carbono-12 são acumulados continuamente na vegetação. Como muitos

animais comem plantas e outros se alimentam deles, todos possuem um pouco de carbono acumulado no organismo.

O carbono-14 absorvido pelas plantas na forma de CO₂, ao decair, é imediatamente substituído por carbono-14 retirado da atmosfera. Dessa forma, é mantido um equilíbrio da ordem de um átomo de carbono-14 para cada 100 bilhões de átomos de carbono-12. Segundo Tipler e Llewellyn (2006), a razão de ¹⁴C/¹²C de equilíbrio atualmente na atmosfera é $1,35 \times 10^{-12}$, a mesma relação existente nos organismos vivos. Ao morrer, a planta deixa de absorver carbono-14 da atmosfera. Nesse caso, a taxa de ¹⁴C/¹²C começa a diminuir em virtude do decaimento radioativo do carbono-14. Assim, quanto maior for o tempo desde a morte da planta ou do organismo, menor a porcentagem de carbono-14 em relação ao carbono-12.

Com base nesses conhecimentos, Libby teve a ideia de usar a taxa de decaimento do carbono-14 para estimar a idade de amostras arqueológicas. Como a meia-vida do carbono-14 é de 5.730 anos, metade dos átomos existente em uma planta ou em um organismo que morre hoje decairá em 5.730 anos, a metade restante decairá nos próximos 5.730 anos, e assim sucessivamente. O método de datação por carbono-14 consiste, então, em se determinar o tempo decorrido desde a morte do organismo por meio da medição da radioatividade dos átomos de carbono-14 restantes. Segundo Hewitt (2011), a técnica permite investigar o passado até 50.000 anos atrás.

Não obstante, a datação pelo carbono-14 não é tão simples assim, uma vez que a concentração de carbono-14 na atmosfera e a intensidade de raios cósmicos sofrem variações ao longo do tempo. Para um cálculo mais preciso da idade de uma amostra devem-se levar em conta: (i) as flutuações do campo magnético do Sol, como também alterações no campo magnético da Terra, que afetam o fluxo de raios cósmicos que incidem na atmosfera; (ii) as mudanças na composição da atmosfera, que ocorrem em virtude de fenômenos químicos e geológicos, como também por mudanças na temperatura média da atmosfera. (HEWITT, 2011; TIPLER; LLEWELLYN, 2006).

Os nuclídeos radioativos também são usados para a determinação da idade de rochas, meteoritos ou materiais inorgânicos. A técnica consiste em medir a concentração relativa de dois isótopos. Um deles deve ser radioativo ou o produto final estável de uma família de decaimentos. O cálculo é realizado comparando-se a concentração do isótopo remanescente que existe hoje na rocha ou no objeto de que se deseja determinar a idade, com a abundância conhecida ou presumida do isótopo radioativo que existia no material na ocasião em que se formou. Por exemplo, após vários estágios o urânio-238, com meia-vida de 4,5

bilhões de anos, decai até se transformar no isótopo estável de chumbo-206. Então, qualquer quantidade de chumbo-206 que exista agora em uma rocha já foi urânio-238 no passado. Quanto mais antiga for a rocha, maior é a percentagem do isótopo remanescente.

As aplicações mais importantes das radiações nucleares estão, sem dúvida, na medicina. Os radioisótopos são utilizados para exames de diagnóstico e para o tratamento de doenças, principalmente o câncer. Tipler e Llewellyn (2006) comentam que a disponibilidade de detectores mais sensíveis e de computadores mais potentes tem contribuído significativamente para o avanço da medicina nuclear nos últimos anos. Tanto na área de diagnósticos de doenças quanto na de tratamento delas são usadas fontes radioativas seladas e não seladas. A fonte selada encontra-se encapsulada no interior de um cabeçote blindado, sendo exposta através de um orifício apenas no momento da aplicação. Nas fontes não seladas o material radioativo fica exposto sem um encapsulamento definitivo e pode irradiar as pessoas e o ambiente à sua volta.

A radiologia diagnóstica utiliza fontes de raios X (não são energia nuclear, e sim, atômica) para auxiliar nos exames médicos. Teve origem com a radiografia, ou seja, com o uso dos raios X descobertos por Röntgen em 1895. A técnica possibilitou a obtenção de imagens internas de objetos opacos, sendo o raio X o único tipo de radiação utilizado ao longo de 50 anos. A radioterapia teve início com a aplicação do elemento químico *rádio* pelo casal Curie para combater o câncer. Utiliza fontes radioativas seladas, raios X e aceleradores de partículas para o tratamento de doenças. Já a área da medicina nuclear originou-se no final da década de 1940, com a introdução de radioisótopos no corpo de pacientes. A técnica tornou possível investigar seletivamente o funcionamento de órgãos específicos do corpo.

A radioterapia consiste em remover uma porção de tecido do corpo do paciente através da indução de morte celular com o uso de fontes de radiação. Uma das formas de tratamento é a *teleterapia*, realizada com uma fonte externa radioativa colocada a uma determinada distância da lesão do paciente. A técnica mais utilizada é a da bomba de cobalto-60. A fonte radioativa (o cobalto-60) fica encapsulada e blindada no interior de um cabeçote de chumbo e aço, para que a radiação não escape. No momento da aplicação a fonte é deslocada de dentro do cabeçote para a frente de um orifício que permite a passagem da radiação em direção ao local que deve ser tratado ou irradiado. Após a aplicação, a fonte é recolhida novamente para um local seguro. Esse processo vem sendo substituído por aceleradores lineares de feixe de elétrons. Outra forma de tratamento é a *braquiterapia*, que emprega uma fonte radioativa selada colocada em contato ou muito perto da lesão, ou mesmo implantada no corpo do

paciente por um determinado período de tempo. No processo, a radiação afeta uma área específica junto à lesão, o que reduz a exposição de tecidos saudáveis no entorno. O procedimento é utilizado, por exemplo, no tratamento de câncer de útero, próstata, mama e pele. (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005; OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Para a realização dos exames de diagnóstico e o tratamento radioterápico, os radiofármacos são uma ferramenta muito importante. No Brasil, tais substâncias são produzidas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo, e no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro. Os radioisótopos são produzidos em reatores nucleares ou em aceleradores de partículas (Cf. Apêndice A). O radiofármaco é obtido associando-se uma substância química (fármaco) ao radioisótopo (chamado de traçador na área médica), que, por sua vez, associa-se a algum órgão ou tecido específico do corpo, onde se concentra.

Segundo Gonçalves e Almeida (2005), na medicina nuclear diagnóstica o radiofármaco é utilizado como traçador radioativo, o chamado contraste, em virtude de suas características. Pode ser introduzido no corpo da pessoa por ingestão, inalação ou injeção. Ao ser introduzido no paciente, concentra-se em determinado órgão ou tecido e emite radiação. Externamente, um aparelho apropriado detecta a radiação emitida e a transforma em imagem, delimitando o local exato da desordem. Isso permite ao médico interpretar as informações e o funcionamento do órgão. Cardoso (2003) explica, por exemplo, que para o diagnóstico de distúrbios metabólicos é realizado o exame da glândula tireoide, localizada no pescoço. Para isso, o paciente ingere o iodo-131, que é absorvido preferencialmente pela glândula tireoide. Um detector de radiação, o cintilômetro, passa em frente do pescoço do paciente e traça um mapa da glândula, determinando o seu tamanho, forma e atividade. O exame realizado pelo cintilômetro é conhecido como cintilografia. Um computador exibe a informação na forma de imagem; esta imagem é então comparada com uma imagem padrão da tireoide normal, permitindo ao médico realizar o radiodiagnóstico.

Entre os radionuclídeos mais importantes na medicina nuclear diagnóstica está o tecnécio-99 (Tc-99m), um emissor gama com meia-vida de seis horas. É utilizado para o mapeamento de diversos órgãos - como os rins, o cérebro, o fígado, a medula óssea, os pulmões e a tireoide. Segundo a Sociedade Brasileira de Medicina Nuclear (SBMN, 2007), o iodo-131 foi o primeiro radioisótopo utilizado nos exames de cintilografia da tireoide, porém tem sido pouco empregado porque oferece maior dose de radiação ao paciente e pior qualidade de imagem. O iodo-123 (meia-vida de oito dias) produz imagens com qualidade

superior à do iodo-131, porém seu custo é muito alto. Atualmente o tecnécio-99m é o mais utilizado nos exames de tireoide, pelo fato de a dose de radiação ser menor e de a qualidade de imagem ser muito melhor. De acordo com Bezerra (2001), o iodo-123 ultrapuro é indicado principalmente para o diagnóstico da tireoide em crianças, pelo fato de ter meia-vida bem curta (apenas treze horas). Outros radionuclídeos importantes são o tálio-201, com meia-vida de 74 horas, utilizado na cintilografia do coração, e o gálio-67, com meia-vida de 77,9 horas, para mapeamento de tumores e abscessos.

Uma metodologia da medicina nuclear que tem tido um amplo destaque é a PET – *Positron Emission Tomography* (Tomografia por Emissão de Pósitrons), também conhecida como PETSCAN ou PET/CT. De acordo com Tipler e Llewellyn (2006), a técnica tem origem na tomografia computadorizada, inventada na década de 1970, que possibilitou a realização de exames de raios X mais precisos. A PET é muito utilizada para diagnósticos nas áreas de oncologia, neurologia e cardiologia. Para o exame utilizam-se substâncias radioativas. O radiofármaco mais empregado é o FDG (deoxifluoroglicose $C_6H_{11}^{18}FO_5$), marcado com o flúor-18, um emissor beta+ (β^+). O FDG-18F, ao ser introduzido no corpo do paciente, é capturado por células que têm grande consumo de glicose, como as tumorais e do cérebro, possibilitando o mapeamento dos tecidos. A característica do radioisótopo é o decaimento com emissão de pósitrons: um pósitron emitido e um elétron do tecido do paciente, ao colidirem um com o outro, são aniquilados e dois fótons são emitidos em sentidos opostos, ou seja, são gerados dois raios gama. Os fótons são detectados externamente por detectores colocados ao redor do corpo do paciente, que determinam o ponto exato de origem da emissão. Os sinais válidos são enviados para processamento em um computador, que produz imagens tridimensionais e dinâmicas dos órgãos investigados. A PET é considerada o exame de radiodiagnóstico por imagem mais avançado disponível hoje. Não obstante, há uma limitação para o uso da técnica: o radioisótopo, com meia-vida de poucos minutos, requer que o local onde é realizado o exame seja próximo do local onde é produzido o radiofármaco; mas este problema vem sendo superado. (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005; OKUNO; YOSHIMURA, 2010; TIPLER; LLEWELLYN; 2006).

Enquanto a medicina nuclear diagnóstica utiliza os radioisótopos para mapear um determinado órgão, a medicina nuclear terapêutica emprega os radioisótopos para tratar algum órgão específico, principalmente para combater o câncer. Por exemplo, no tratamento de tumores na tireoide é administrado o iodo -131 na forma de iodeto de sódio, via oral, por ser um beta-emissor fortemente capturado pela glândula tireoide. A radiação emitida pelo

radioisótopo age sobre os tecidos tireoideanos, diminuindo o nível de atividade de acordo com o decaimento radioativo.

Os pacientes da medicina nuclear diagnóstica e terapêutica permanecem radioativos durante algum tempo, até que eliminem os radioisótopos física ou biologicamente. Por esse motivo, os radionuclídeos devem ter meia-vida curta, da ordem de dias ou horas, para não causar dano ao paciente. Caso seja utilizado após passar o prazo de uma meia-vida, o radioisótopo perde metade de sua atividade e o efeito obtido não será mais o desejável. Desse modo, um hospital ou laboratório deve fazer um bom planejamento ao utilizar tais medicamentos, não só em virtude da meia-vida curta e dos resultados satisfatórios que se deseja alcançar, mas também por causa do alto custo de produção.

A aplicação da energia nuclear com fins pacíficos tem tido bastante sucesso. Ao se tornar conhecida em virtude das bombas atômicas e dos acidentes nucleares, a energia nuclear adquiriu conotação negativa e despertou nas pessoas o temor e a rejeição de seu uso. Entendemos que as discussões a respeito dos riscos e benefícios são fundamentais, no sentido de contribuir para a melhoria da segurança nas diversas áreas de aplicação e da qualidade de vida do ser humano.

4.4. LIÇÕES DOS ACIDENTES NUCLEARES E RADIOATIVOS

O fantasma das bombas atômicas e os impactantes acidentes ocorridos em usinas nucleares foram reveladores dos perigos do mau uso da energia nuclear. Existe ainda a preocupação com o armazenamento dos rejeitos radioativos, com a produção de plutônio e o aumento do arsenal nuclear por parte de alguns países de regime ditatorial, que reforçam a imagem negativa da energia nuclear.

Segundo Tipler e Llewellyn (2006), a segurança dos reatores de fissão vem sendo alvo de calorosas discussões desde o acidente com o reator de Windscale, na Inglaterra, em 1957. Um reator de fissão não explode como uma bomba atômica, mas a preocupação é que ocorra a fusão do núcleo. No caso de haver falha na parte elétrica do sistema de resfriamento, o reator pode ser desligado e, assim, a reação em cadeia é interrompida; porém o reator continua superaquecendo. O calor é produzido pelo decaimento radioativo dos núcleos resultantes das fissões. O decaimento é um processo espontâneo e incontrolável pelo homem; além disso, não é possível extingui-lo instantaneamente, uma vez que a taxa de desintegração diminui

gradativamente. Em virtude do aquecimento, o núcleo central do reator pode derreter e, na pior das hipóteses, perfurar a contenção de aço.

Cardoso (2003) explica que um acidente é considerado radioativo quando, de alguma forma, há liberação de radiação de uma fonte radioativa no meio ambiente, embora não ocorra reação nuclear. Quando o acidente envolve reação nuclear ou quando o equipamento onde acontece a reação é danificado – por exemplo, com o derretimento do núcleo de um reator - o acidente é considerado nuclear.

De acordo com Faria (1989), é muito complicado consertar um acidente nuclear ou radioativo. As consequências são catastróficas. O material radioativo, dependendo de seu estado físico (sólido, líquido ou gasoso), pode ser levado pelo vento, pela água ou pelas próprias pessoas envolvidas no acidente. O solo, as plantações, os rios e oceanos que entram em contato com o material radioativo ficam contaminados. Assim, se uma pessoa comer um alimento contaminado ou uma vaca pastar em uma plantação contaminada, eles ficarão contaminados. Até o leite da vaca ficará contaminado. No caso de exposição à radiação, as consequências aparecem sob diversas formas de agressão ao ser humano e ao meio ambiente, dependendo do tempo de exposição e da dose de radiação absorvida. Por isso é fundamental que especialistas e técnicos que trabalham na área nuclear sejam muito bem preparados e tenham competência para fazer um trabalho preventivo, no sentido de evitar qualquer falha na operação de equipamentos. Caso ocorra um acidente, os responsáveis devem ser capazes de assumir o controle da situação, tomar as providências necessárias imediatamente e informar, com transparência, a extensão e as consequências do acidente.

Nessa seção apresentamos alguns eventos que culminaram em desastres de grande repercussão mundial: os acidentes nucleares de Three Mile Island e Chernobyl, o acidente radioativo de Goiânia e o mais recente, o de Fukushima. Os acontecimentos relacionados a esses eventos revelam falhas nos projetos de usinas, falha humana na operação de reatores, irresponsabilidade de autoridades, negligência daqueles que deveriam zelar pela segurança de todos e desconhecimento de cidadãos com relação à energia nuclear.

4.4.1. O acidente nuclear de Three Mile Island

A usina de Three Mile Island está localizada perto de Harrisburg, Pensilvânia, nos Estados Unidos da América. Em março de 1979, 40% do núcleo do reator número 2 se

fundiram após falha humana de um dos operadores. De acordo com Cardoso (2005), o reator era um modelo PWR, do mesmo tipo dos reatores de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. Houve vazamento de água e vapor do circuito primário. Com a perda de água do sistema de resfriamento os elementos combustíveis esquentaram demais, de modo suficiente para derreter parcialmente o núcleo do reator; entretanto a contenção de aço foi preservada, dificultando o escape de radiação para o meio ambiente.

Para garantir a segurança dos moradores, mulheres e crianças foram retiradas da cidade, só retornando no dia seguinte. As consequências do acidente não foram tão graves porque foi liberada pouca radiação no meio ambiente; porém contribuíram para paralisar a expansão das usinas por duas décadas, paralisação que foi acentuada pelo acidente de Chernobyl.

4.4.2. A catástrofe nuclear de Chernobyl

O grave desastre de Chernobyl, ocorrido na Ucrânia em 26 de abril de 1986, foi o pior acidente nuclear da história mundial. Na ocasião, a Ucrânia pertencia à então União Soviética.

De acordo com Tipler e Llewellyn (2006), o reator era um modelo que usava grafita no núcleo com dupla função: gerar energia elétrica e produzir plutônio para armas nucleares. Esse modelo, que não possui vaso de contenção, encontra-se em operação somente na Rússia e na Ucrânia. Cardoso (2005) explica que as varetas de combustível do reator são colocadas dentro de blocos de grafita, e entre as varetas passam os tubos de água para refrigeração, gerando o vapor que aciona as turbinas. Devido aos blocos de grafita, as dimensões do edifício do reator são maiores quando comparadas com as de outros modelos. Assim, o prédio funciona como única contenção, não é lacrado e possui apenas uma tampa de concreto. Em caso de falha no funcionamento o reator desliga-se automaticamente, permitindo que a operação seja realizada manualmente; mas no caso de falha humana, o sistema não se desliga automaticamente.

No momento do acidente estavam sendo realizados testes na parte elétrica do reator número 4, e para isso o sistema automático de segurança havia sido desligado. O reator funcionava com baixa potência e o sistema de refrigeração estava desativado. Os operadores não tinham qualificação, de acordo com as normas internacionais de segurança, para gerenciar o modelo do reator de Chernobyl. Desse modo, o alto risco de acidente foi desprezado e a

operação continuou. Como consequência, houve aquecimento suficiente para transformar total e rapidamente em vapor a água que circulava nos tubos, de forma explosiva. Por volta da 01h 23min do dia 26 de abril foi ordenada a parada total do reator, mas o procedimento não impediu a catástrofe que se seguiu após poucos segundos. A explosão de vapor foi tão intensa que destruiu os tubos e os elementos combustíveis e deslocou a tampa do edifício do reator. O teto do prédio ficou destruído, deixando exposto o reator. O aquecimento fez a grafita entrar em combustão. O calor liberado foi transmitido para o urânio que estava nos elementos combustíveis, que também entrou em combustão. Um grande incêndio se seguiu, lançando para o meio ambiente parte do material radioativo. (CARDOSO, 2005; TIPLER; LLEWELLYN, 2006).

As autoridades da então União Soviética demoraram em admitir o grave acidente. Plumas de radionuclídeos foram espalhadas pelos ventos por toda a Europa, a maior parte nos primeiros dez dias. Chuvas locais contribuíram para que as partículas radioativas se distribuíssem local e regionalmente. Entre 26 e 27 de abril a nuvem de radiação se espalhou por mais de 1.000 quilômetros na direção norte. No dia 28 a poeira radioativa chegou à Suécia, onde foi detectada nas proximidades de uma usina nuclear durante medidas rotineiras, mas o governo soviético ainda resistia em admitir o desastre. A Agência Internacional de Energia Nuclear (AIEA) foi alertada pelos suecos dos altos índices de radiação sobre a Europa. Somente na noite de 28 de abril as autoridades russas comunicaram o acidente à AIEA e ao mundo. Satélites espiões europeus e americanos voltaram-se para a União Soviética e constataram claramente o terrível desastre na Ucrânia.

As vítimas mais graves foram levadas imediatamente para o Hospital número 6 de Moscou, o único no país especializado no tratamento de problemas causados por radiação. Segundo Okuno (2007), nas primeiras 24 horas foram internadas 129 pessoas e nas 24 horas seguintes, mais 170 feridos. Outras vítimas com menor gravidade foram levadas para hospitais da cidade de Kiev. Médicos tiveram que aprender como tratar os pacientes. Várias pessoas sofreram queimaduras por causa do intenso calor que se seguiu ao incêndio, e ainda foram expostas à radiação. Os sintomas iniciais causados pela exposição à radiação são náuseas, vômitos e diarreia. Os sintomas mais preocupantes, como danos na medula óssea e queimaduras provocadas pela radioatividade, aparecem após um período de latência. O levantamento das doses de radiação absorvida foi realizado com base na contagem de danos cromossômicos, na contagem de linfócitos, no histórico de início de náuseas e na extensão de queimaduras causadas pela radiação. Okuno comenta que diversas pessoas receberam doses

acima de 10 Gy, cinquenta receberam doses de cerca de 5 Gy, e outras duzentas pessoas, de cerca de 1 Gy.

As primeiras medidas de segurança da população que vivia ao redor da usina de Chernobyl começaram a ser tomadas mais de trinta horas após o acidente. Moradores de Pripjat, cidade localizada a três quilômetros da usina nuclear, tiveram prazo de duas horas para pegar o necessário e aguardar na porta de suas casas os ônibus que os levariam para sempre de seus lares. Foram utilizados 1.100 ônibus para retirar cerca de 49.000 moradores em um raio de dez quilômetros da usina. Os habitantes da cidade de Chernobyl, localizada a dezoito quilômetros da central nuclear, foram evacuados uma semana mais tarde, juntamente com outros residentes em um raio de trinta quilômetros do reator.

Durante as primeiras 24 horas após a explosão, houve a liberação na atmosfera de no mínimo 17 milhões e no máximo 2.400 milhões de curie de radionuclídeos, de acordo com relatório de um laboratório italiano. Cientistas soviéticos estimaram que 100% de radionuclídeos de gases nobres presentes no reator foram lançados no meio ambiente. Medidas realizadas por um laboratório norte-americano em 7 de maio de 1986 mostraram que houve liberação na atmosfera de cerca de 40 milhões de curie de iodo-131 e 3 milhões de curie de césio-137. O iodo-131 foi o radioisótopo que causou maior preocupação aos europeus, em virtude de sua meia-vida (8,05 dias) e da quantidade depositada no solo, principalmente na região de Saluggia, na Itália, onde foi verificada a maior concentração. Em algumas regiões, tabletes contendo iodo não radioativo foram distribuídos à população para saturar a tireoide e evitar, assim, a absorção do iodo-131. (OKUNO, 2007).

Vinte anos após o acidente, entrevistas concedidas por autoridades, militares, cientistas e trabalhadores que participaram das ações em Chernobyl revelaram o heroísmo de milhares de pessoas que colocaram a vida em risco para conter a radioatividade liberada pela explosão na usina (JOHNSON, 2005). O reator deveria ser selado rapidamente para impedir que a nuvem radioativa continuasse a se espalhar por toda a Europa.

Uma gigantesca operação foi montada. Após a evacuação da população de Pripjat, permaneceram na cidade apenas os militares, especialistas e cientistas, correndo ali altos riscos de irradiação. Na tentativa de abafar o incêndio, sacos de areia foram lançados diretamente sobre o fogo no reator, durante centenas de sobrevoos de helicópteros militares. A operação foi muito arriscada, devido aos altos índices de radiação e ao intenso calor. Finalmente, seis mil toneladas de areia e ácido bórico cobriram a cratera. Não obstante, a temperatura no interior do reator continuava a subir, em decorrência da queima de

combustível nuclear, provocando fissuras na laje de concreto sob o núcleo do reator. Se a laje se partisse, a grafita e o urânio que queimavam entrariam em contato com a água acumulada embaixo da laje, o que causaria uma segunda explosão mais devastadora do que a primeira. As autoridades soviéticas tomaram duas medidas importantes para evitar um desastre maior. A primeira foi enviar bombeiros para retirar a água acumulada sob a laje do reator; a segunda foi despejar 2.400 toneladas de blocos de chumbo para baixar a temperatura do reator. Conforme o chumbo ia derretendo a fissura foi sendo selada, a temperatura caiu e a radiação diminuiu; porém o combustível continuava a queimar. Parte do chumbo evaporou para a atmosfera e contaminou o ambiente. Através de tubos de concreto da planta da usina, técnicos soviéticos chegaram à área ativa do reator e constataram que parte do magma havia vazado por uma fissura e se acumulado logo abaixo, em uma câmara vazia. Era preciso garantir que novas fissuras não se abrissem. O magma não podia alcançar o aquífero que abastecia uma vasta região.

No dia 12 de maio, dezesseis dias depois do acidente, mineiros de Toulou foram convocados para trabalhar na usina, na tentativa de conter o avanço do magma. Cerca de dez mil mineiros russos e ucranianos trabalharam no túnel sem ventilação e sem qualquer equipamento de proteção contra radiação, durante um mês. Nenhum deles foi informado sobre os perigos que corriam. Os trabalhadores cavaram um túnel de 150 metros até chegarem abaixo do reator número 4, onde construíram uma câmara para resfriamento com nitrogênio líquido; porém o sistema de refrigeração não foi montado. A câmara foi preenchida com concreto para dar sustentação sólida à estrutura do reator. O incêndio foi finalmente controlado, mas todos os trabalhadores foram contaminados. Estima-se que um quarto dos mineiros tenha morrido antes dos 40 anos de idade.

Embora o incêndio no reator tivesse sido debelado, a radiação continuava a ser emitida em virtude do decaimento radioativo. Cerca de cem mil soldados e oficiais passaram por Chernobyl no prazo de um ano, com o objetivo de limpar o solo contaminado em um raio de trinta quilômetros no entorno do reator. Outra tarefa de alto risco realizada pelos militares foi a de recolher os destroços radioativos do telhado da usina, que se espalharam com a explosão. Apesar de tudo, o problema ainda estava longe de ser resolvido. O isolamento do reator era crucial para impedir que radionuclídeos continuassem a se espalhar no meio ambiente. Um enorme sarcófago de aço e concreto, com 170 metros de comprimento por 66 metros de altura, foi montado em torno do reator, isolando-o completamente. Durante a operação os operários só podiam trabalhar com máquinas blindadas que operavam à distância, e não

podiam ficar mais do que poucos minutos. A construção do sarcófago foi concluída cerca de sete meses após a explosão. Entre civis e militares, mais de quinhentas mil pessoas trabalharam em Chernobyl para limpar a área e conter a liberação de radiação para o ambiente. Todas foram expostas a altos níveis de radiação. Segundo depoimento do físico nuclear Vassili Nesterenko, dentro da blindagem há ainda cerca de 100 Kg de plutônio, suficientes para contaminar 100 milhões de pessoas (JOHNSON, 2005).

A zona de exclusão de Chernobyl compreende uma área delimitada em um raio de trinta quilômetros da usina nuclear desativada. Segundo os biólogos norte-americanos Chesser e Baker (2011), mais de 135 mil habitantes foram evacuados e a região ficou dizimada. As árvores da floresta mudaram de cor, adquirindo uma coloração vermelha, como consequência da morte por radiação. Todos os pinheiros morreram, sobraram apenas as bétulas. Chesser e Baker passaram doze anos estudando os efeitos biológicos de longo prazo da radiação ionizante em animais que viviam na zona de exclusão de Chernobyl. Os cientistas estiveram na região, pela primeira vez, no verão de 1994. Na ocasião, a uma distância de dois quilômetros da usina, os contadores Geiger que os pesquisadores levaram para medir o nível de radiação não paravam de apitar. A região ainda estava muito radioativa. Após uma série de experimentos, os pesquisadores constataram altos índices de radiação nos ossos e nos músculos de camundongos, contudo os animais e os embriões das fêmeas prenhas pareciam fisicamente normais. Segundo relato dos pesquisadores, as análises cromossômicas demonstraram que as diferenças genéticas observadas eram devidas à evolução da espécie ao longo do tempo, e não a mutações decorrentes da radiação, como erroneamente haviam pensado no início dos estudos. O mesmo foi verificado com a maioria de outros animais estudados. Os autores comentam que a nuvem de radiação que se seguiu ao acidente não se depositou uniformemente em torno do reator. Formou-se uma espécie de mosaico de habitats radioativos e áreas não afetadas pela radiação, o que dificultou a avaliação dos efeitos da contaminação na vida animal pelo fato de espécies migrarem de um local para outro.

Por outro lado, Chesser e Baker (2011) constataram que na zona de exclusão de Chernobyl a vida selvagem voltou a prosperar após uma diminuição inicial provocada pela precipitação radioativa. A região se tornou um refúgio para o cavalo-de-przewalski e o bisão-europeu. A quantidade de porco-do-mato selvagem da Rússia é de dez a quinze vezes maior na zona de exclusão do que na região desabitada no entorno. Segundo os pesquisadores, a cegonha-negra e a águia-rabalva, espécies ameaçadas de extinção, são mais comuns na zona de exclusão do que em outras áreas da antiga União Soviética. A região parece ter se tornado

uma área de preservação. Não obstante, os autores alertam que estudos realizados sobre as consequências biológicas da contaminação no ambiente variam muito ou são contraditórios, e não podem ser qualificados como pesquisas radiológicas.

O número oficial de pessoas que perderam a vida por causa do acidente nuclear de Chernobyl é de 31 até o final de 1986, sendo que duas delas morreram no momento da explosão (OKUNO, 2007). De acordo com Chesser e Baker (2011), estima-se que quatro mil pessoas que viviam em Pripyat morreram de câncer por causa da exposição direta à nuvem de radiação que passou pela periferia da cidade. O número de mortes teria sido maior se os ventos tivessem levado as plumas radioativas diretamente sobre a cidade, mas não se sabe ao certo a extensão dos danos causados às pessoas. Não há contagem do número de mortes provocadas por câncer ou de defeitos de nascença. Relatos descontraídos informam que houve 93.500 mortes, outros falam em 70.000, em 4.000 ou apenas 31 mortes.

Embora cientistas, médicos e especialistas tenham aprendido muito com o acidente de Chernobyl, as informações conflitantes sobre os efeitos da radiação nos seres vivos e no ambiente dificultaram o reconhecimento real da extensão dos danos causados pelo desastre. As lições de Chernobyl lembram constantemente os riscos da opção nuclear, mas também contribuíram para despertar no mundo a necessidade de desenvolver novas opções energéticas, que sejam mais seguras e não agravem as mudanças climáticas do planeta.

4.4.3. O acidente radioativo de Goiânia

Um instituto particular de radioterapia localizado em Goiânia, capital do Estado de Goiás, havia se mudado para novas instalações no final de 1985. No prédio desocupado foi deixado um aparelho de radioterapia de césio-137, que estava em desuso. A fonte havia sido desativada após anos de uso, porém sua atividade radioativa ainda continuava muito alta. Os responsáveis não notificaram as autoridades de licenciamento como determinam as normas legais.

As antigas instalações do instituto foram parcialmente demolidas, transformando-se em abrigo para mendigos. Um catador de papel tomou conhecimento de que no prédio abandonado havia um aparelho esquecido, que continha uma peça de chumbo de considerável valor financeiro nos ferros-velhos. No dia 13 de setembro de 1987 o catador de papel convidou um amigo para entrarem no prédio e pegar a peça. Usando marretas, os dois amigos

conseguiram separar o cilindro de chumbo e metal da carcaça do aparelho, onde estava a fonte radioativa. O cilindro, de 120 Kg, foi levado em um carrinho de mão. Ainda no mesmo dia os dois amigos violaram o lacre da cápsula blindada – um cilindro com 3,6 cm de diâmetro por 3,0 cm de altura -, que armazenava a fonte de cézio-137, que é emissor gama. O material radioativo encontrava-se na forma de pó de cloreto de cézio, empastilhado com um aglutinante. É altamente solúvel em água e se dispersa com rapidez. Tem cor azul-brilhante intensa e é muito bonito. O cézio-137 ficou totalmente exposto. Na época, a atividade da amostra radioativa era de 1.375 curies (aproximadamente 5×10^{13} becquerels, ou em unidades do Sistema Internacional).

Segundo Okuno (2007), já no primeiro dia o catador de papel teve tonturas, náuseas e vômitos - os primeiros sintomas da exposição e contaminação por radiação -, mas atribuiu o mal-estar a alimentos. Procurou ajuda médica, mas os médicos pensaram tratar-se de uma reação alérgica e o liberaram. Seu quadro clínico se agravou e após dez dias foi internado em um hospital, mas ainda não havia qualquer suspeita de contaminação radioativa. O amigo também teve náuseas e vômitos no primeiro dia, e cerca de um mês depois teve seu antebraço direito amputado.

De acordo com dados da Superintendência Leide das Neves Ferreira (SULEIDE, 2012), no dia 18 de setembro a maior parte do cilindro – um conjunto de 98 Kg de chumbo e aço com a fonte radioativa exposta no interior do cilindro - foi vendida ao proprietário de um ferro-velho. Durante a noite, ao passar pelo pátio escuro do estabelecimento, o negociante percebeu a luz azul intensa que saía do orifício do cilindro. Pensando tratar-se de algo muito valioso, o dono do ferro-velho transportou a cápsula para dentro de sua casa. Com a ajuda de uma chave de fenda, ele conseguiu extrair pedacinhos das pastilhas de cézio-137, que ao menor toque se transformavam em pó. A fonte radioativa era exibida aos parentes, amigos e conhecidos. Todos ficavam fascinados com o intenso brilho azul. Durante cinco dias o dono de ferro-velho distribuiu fragmentos do tamanho de um grão de arroz aos seus familiares e amigos. O seu irmão carregou no bolso da calça a pequena porção que ganhara de presente, para mostra-la à sua família. Assim, começou um dos mais graves acidentes radioativos já ocorridos (AIEA, 1988).

As pessoas que tocaram na fonte radioativa foram contaminadas, e ao tocarem em suas próprias roupas, em objetos como corrimãos de escadas e maçanetas, nos ônibus circulares ou em outras pessoas, iam distribuindo o pó de cloreto de cézio. Várias pessoas passaram a apresentar problemas gastrointestinais, porém os sintomas não eram atribuídos a efeitos da

radiação. Dias depois Maria Gabriela, de 29 anos de idade, esposa do dono do ferro-velho, relacionou o mal-estar dos familiares à fonte que guardava em sua casa.

No dia 28 de setembro Maria Gabriela acondicionou em um saco de fibra parte do material radioativo juntamente com um pedaço de chumbo que seria vendido. Com a ajuda de um funcionário levou o material, de ônibus coletivo, até o Centro de Vigilância Sanitária de Goiânia. No trajeto, várias pessoas foram expostas à radiação. No dia seguinte o médico veterinário que atendeu Maria Gabriela informou o Centro de Informações Toxicológicas do Hospital de Doenças Tropicais de Goiânia sobre a peça. Ao mesmo tempo, dois médicos do hospital que atendiam mais de dez pacientes com os mesmos sintomas, entre eles Maria Gabriela e o catador de papel, suspeitaram de contaminação radioativa. A Secretaria do Meio Ambiente, ao ser informada do ocorrido, solicitou a ajuda de um físico que estava de férias na cidade. Após uma avaliação com um medidor de radiação do escritório da NUCLEBRAS de Goiânia, o físico constatou que a área no entorno do Centro de Vigilância Sanitária apresentava alta contaminação radioativa, concluindo que o material que lá se encontrava era uma potente fonte radioativa. O físico ainda impediu que bombeiros, que haviam sido chamados para levar o material, jogassem a cápsula em um rio que cortava a cidade. Por iniciativa própria, o físico logo tomou as primeiras medidas e evacuou duas áreas - o Centro de Vigilância Sanitária e o entorno da casa do proprietário de ferro-velho -. Ao mesmo tempo, as autoridades foram informadas sobre o acidente. (SULEIDE, 2012).

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sediada no Rio de Janeiro, foi imediatamente comunicada do acidente na tarde do dia 29 de setembro. À noite, no Estádio Olímpico de Goiânia, iniciou-se a triagem das pessoas das duas áreas isoladas, onde ficaram em tendas para monitoramento. Na madrugada do dia 30 o coordenador de emergências nucleares da CNEN e dois técnicos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) já se encontravam na capital goiana.

A CNEN informou o caso à Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Um plano de emergência foi acionado para gerir o problema, do qual participaram a CNEN, Furnas Centrais Elétricas, Empresas Nucleares Brasileiras (NUCLEBRAS), a Defesa Civil, a ala de emergência nuclear do Hospital Naval Marcílio Dias (no Rio de Janeiro) e a Secretaria Estadual de Saúde de Goiás. O acidente radioativo foi reconhecido como grave. Duas providências foram imediatamente colocadas em prática: identificar e isolar rapidamente as áreas contaminadas e identificar, descontaminar e encaminhar para tratamento adequado as pessoas afetadas. (FARIA, 1989).

Sete áreas foram rapidamente identificadas como focos de irradiação e os residentes imediatamente evacuados. Físicos e médicos de São Paulo, do Rio de Janeiro, da Argentina, da Alemanha, dos Estados Unidos da América e da Rússia chegaram a Goiânia no início de outubro. Cerca de 500 técnicos da CNEN trabalharam na descontaminação das pessoas e das áreas afetadas. Os técnicos também ficaram expostos à irradiação. Entre 30 de setembro e 20 de dezembro de 1987, foram monitoradas 112.800 pessoas. Entre essas, 1.000 sofreram irradiação (foram expostas à radiação, porém, não foram contaminadas) e 249 apresentaram significativa contaminação interna e/ou externa. A contaminação aconteceu através do contato com a pele (externa), inalação, ingestão ou absorção através de microlesões na pele (interna). Das 249 pessoas, 120 foram liberadas após descontaminação quando as partículas radioativas apresentavam-se apenas nas roupas e sapatos, e 79 tiveram que ser internadas. (AIEA, 1988; FARIA, 1989; GOIÁS, 2013).

De acordo com dados da Secretaria de Saúde do Estado de Goiás (GOIÁS, 2013), do grupo de 129 pessoas contaminadas externa e/ou internamente, 8 desenvolveram a Síndrome Aguda da Radiação (SAR), 14 apresentaram danos na medula óssea, 28 pessoas desenvolveram a Síndrome Cutânea da Radiação e uma pessoa teve o antebraço direito amputado (um dos homens que violou o lacre da cápsula de césio-137). Durante a triagem médica, vinte pessoas foram identificadas com graves sintomas provocados pela contaminação radioativa. Catorze delas foram enviadas para tratamento no Hospital Naval do Rio de Janeiro. Quatro pessoas vieram a falecer no prazo de pouco mais de trinta dias após o contato com o césio-137. A primeira vítima foi Maria Gabriela. A menina Leide, de apenas seis anos, sobrinha de Maria Gabriela, faleceu no dia 23 de outubro, poucas horas depois de sua tia. A garotinha havia passado o pé de césio pelo corpo e depois comera pão segurando-o com a mão coberta de material radioativo. O caso da menina Leide foi muito comentado na ocasião e emocionou muitos brasileiros. As duas outras vítimas eram jovens funcionários do ferro-velho, um de 22 anos e outro de 18 anos, que haviam manuseado a cápsula de blindagem da fonte. (GOIÁS, 2013; OKUNO, 2007).

A CNEN estabeleceu uma série de procedimentos para acondicionar os rejeitos radioativos gerados pelo acidente¹⁸. Os rejeitos produzidos na descontaminação das pessoas foram compactados e os líquidos foram solidificados com cimento. O solo e parte do pavimento das ruas dos locais contaminados foram removidos, algumas casas e barracos

¹⁸ Segundo a organização ambientalista Greenpeace, a CNEN não tinha estrutura de segurança e de técnicos para executar a descontaminação das áreas afetadas e, para isso, contratou uma empresa de obras públicas. Cerca de 200 trabalhadores, sem treinamento adequado, realizaram a limpeza das áreas contaminadas pela radiação (GREENPEACE, 200-).

foram demolidos, móveis e utensílios foram considerados rejeitos radioativos. O material foi abrigado em diferentes embalagens, de acordo com o nível de radioatividade. Os rejeitos com níveis mais altos foram colocados em tambores de 40 ou de 100 litros, que por sua vez foram colocados dentro de tambores de 200 litros ou de caixas metálicas. Os vãos entre os tambores foram preenchidos com concreto. O processo todo gerou cerca de 3.500 m³ de rejeito radioativo, acondicionados em tambores, caixas metálicas, *containers* marítimos de 32 m³ cada e embalagens especiais em concreto armado com paredes de 20 centímetros de espessura. O material foi removido para um depósito provisório a 2,5 quilômetros da cidade de Abadia de Goiás, a 23 quilômetros de Goiânia. Em 1995 foi construído o primeiro depósito definitivo para os rejeitos menos ativos, de acordo com as normas internacionais de segurança. O segundo depósito definitivo foi concluído em 1997, para abrigar rejeitos de alto nível de radioatividade, entre eles os restos da fonte de cézio-137. A monitoração dos rejeitos radioativos e do ambiente, que durará 50 anos, é feita pelo Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste, sob controle da CNEN. (CARDOSO, 2003; OKUNO, 2007).

Em fevereiro de 1988 o governo de Goiás criou a Fundação Leide das Neves Ferreira, transformada posteriormente em Superintendência Leide das Neves Ferreira, para acompanhar os efeitos da radioatividade nas vítimas do acidente. A metodologia de acompanhamento médico dos grupos de pacientes foi definida segundo as normas internacionais, cujos critérios de classificação são estabelecidos com base na gravidade das lesões cutâneas e na intensidade da contaminação interna e externa (GOIÁS, 2013). De acordo com Okuno (2007), seis vítimas apresentam sequelas razoavelmente graves, como queimaduras provocadas pela radiação, e continuam recebendo acompanhamento médico.

O acidente de Goiânia envolveu centenas de pessoas. A negligência na utilização de um equipamento com uma fonte nuclear causou um gravíssimo acidente, que resultou na morte de quatro pessoas e afetou significativamente muitas outras. O compromisso com a vida não se limita às autoridades e cientistas, mas se estende a todos aqueles que utilizam fontes radioativas, qualquer que seja a área de aplicação.

4.4.4. O desastre radioativo de Fukushima Daiichi

No dia 11 de março de 2011, às 14h46min do horário local, aconteceu no Japão um evento *cisne negro*, ou seja, um incidente altamente indesejável, de grande repercussão,

muitíssimo raro e difícil de prever. Um terremoto de magnitude 8,9 pontos na escala Richter, seguido de eventos não previstos, causou o pior acidente nuclear depois do de Chernobyl, ocorrido em 1986. O epicentro foi a 24,4 quilômetros abaixo do solo do Oceano Pacífico, a 130 quilômetros da costa leste japonesa e a 370 quilômetros da capital, Tóquio. Foi o maior terremoto já registrado no país e o sétimo maior do mundo.

O Japão está sobre o Anel de Fogo do Pacífico, uma falha geológica que provoca a mais intensa atividade sísmica do globo terrestre. O sismo foi provocado quando a placa do Pacífico chocou-se contra a placa norte-americana, gerando um tremor seguido de várias réplicas.

O terremoto foi somente o início de uma tragédia maior. O movimento das placas tectônicas empurrou as águas oceânicas para cima e depois para os lados, gerando ondas gigantes, conhecidas como *tsunami*. Segundo Soares (2011), as ondas alcançaram dez metros de altura, porém há estimativas de que as ondas chegaram a atingir alturas de até quinze metros (PIORE, 2011).

O complexo nuclear da cidade de Fukushima, na costa leste do Japão, possui as unidades de Daiichi (Fukushima I) e Daini (Fukushima II). Piore (2011) comenta que o complexo foi construído para suportar terremotos de magnitude de 8,2 graus, portanto, um sismo de 8,9 graus estava dentro de sua margem de segurança; porém o quebra-mar para contenção de *tsunamis* foi construído para suportar ondas de até 5,7 metros de altura (GUNDERSEN, 2012). De acordo com o relatório da Central Nuclear de Fukushima Daiichi (ACRO, 2011), quarenta e um minutos após o terremoto a primeira onda com quatro metros de altura foi detida pela barragem, porém oito minutos mais tarde gigantescas ondas ultrapassaram o quebra-mar e invadiram a usina de Fukushima I, danificando o sistema de refrigeração. Às 16h46min, hora local, o governo japonês declarou situação de emergência nuclear.

A central de Daiichi possui seis reatores nucleares, dos quais três estavam em operação no momento em que ocorreu o terremoto. Os edifícios que abrigavam os reatores números 1, 2 e 3, em virtude do acúmulo de hidrogênio, sofreram explosões que destruíram parcialmente as paredes dos prédios. O quarto reator, que estava inoperante, sofreu um incêndio em um tanque de combustível irradiado (BIELLO, 2011; MATSON, 2011).

Assim que ocorreu o intenso sismo, “apagões” em vários lugares do país interromperam o fornecimento normal de energia elétrica. Embora os reatores tenham se desligado automaticamente durante o tremor, o sistema de refrigeração deveria continuar

funcionando por meio de geradores de emergência a *diesel*, mas não foi o que aconteceu na estação de Daiichi. A inundação danificou os geradores de emergência e interrompeu o sistema automático de refrigeração; ou seja, cessou o suprimento de água que refrigera os reatores. O reator número 1 foi o primeiro a apresentar aquecimento em níveis perigosos. Os técnicos japoneses procuraram colocar em funcionamento os geradores a *diesel* para reativar o resfriamento, mas a tentativa não foi bem-sucedida. Sem abastecimento, o nível de água dentro do vaso de contenção do reator baixou. A reação do metal com a água gerou hidrogênio no interior do edifício, aumentando o risco de explosão.

Mesmo desligado, um reator continua superaquecendo¹⁹ em virtude do decaimento radioativo e, por isso, deve ser resfriado para não derreter. O derretimento de um reator é o pior acidente que pode acontecer em uma usina nuclear, uma vez que a explosão lança na atmosfera grandes quantidades de materiais radioativos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente. Foi o que aconteceu em Chernobyl.

Em virtude do aquecimento no reator número 1, as barras de combustível foram parcialmente danificadas, havendo vazamento de material radioativo para a água que refrigerava o núcleo do reator. Para minimizar o problema, os técnicos abriram as válvulas do reator para liberar o vapor radioativo acumulado e diminuir a pressão interna. No dia seguinte ao terremoto houve a explosão da cobertura do edifício que abrigava o reator, em virtude do acúmulo de hidrogênio, porém, o vaso de contenção permaneceu intacto. Iodo e césio foram detectados. De acordo com a ACRO (2011), quatro trabalhadores ficaram feridos.

No dia 14 de março ocorreu a explosão no edifício do reator número 3. As barras de combustível do reator, de quatro metros de altura, ficaram expostas (descobertas) a uma altura de 2,95 metros, aumentando o risco de explosão do reator e de vazamento de radiação. Onze trabalhadores ficaram feridos, três dos quais foram rejeitados pelos hospitais da região por medo de contaminação radioativa, mas finalmente foram aceitos pelo hospital universitário de Fukushima, vinte horas após a explosão. Gonçalves (2011) comenta que os três trabalhadores que receberam as maiores doses de radiação devem ter um acréscimo de cerca de 5% de probabilidade de contrair câncer, portanto, segundo o autor, não se espera nenhuma fatalidade em virtude do acidente.

No dia 15 ocorreu outra explosão, desta vez no prédio do reator número 2, danificando parcialmente a câmara de alívio de pressão. No mesmo dia aconteceu um incêndio (dominado

¹⁹ O calor é produzido pelo decaimento radioativo dos núcleos resultantes das fissões. O decaimento é um processo espontâneo que não pode ser controlado pelo homem nem pode ser extinto instantaneamente, uma vez que a taxa de desintegração diminui gradativamente.

duas horas depois) no prédio do reator da unidade 4, que estava inoperante no momento do terremoto. O gerente da usina decidiu evacuar cerca de 750 trabalhadores, permanecendo apenas 50 funcionários no local para o trabalho de bombeamento de água. (ACRO, 2011).

Nos dias que se seguiram, engenheiros, técnicos e militares japoneses conseguiram evitar, heroicamente, um acidente pior bombeando água do mar para refrigerar os reatores. A operação foi muito trabalhosa e de alto risco. Caminhões de bombeiros e até helicópteros do exército foram usados na operação, expondo todos os envolvidos à contaminação pelos vapores radioativos expelidos das instalações danificadas. Água misturada com boro foi injetada, aos poucos, nos reatores para controlar a temperatura e, com esse procedimento, os técnicos conseguiram evitar o derretimento das barras de combustível nuclear e a explosão dos reatores.

Apesar do empenho dos japoneses, os vapores radioativos que foram liberados na atmosfera para diminuir a pressão dos reatores contaminaram a região no entorno do complexo nuclear de Fukushima, afetando o meio ambiente, os trabalhadores e as pessoas que ali viviam. Cerca de 80 mil habitantes foram removidos de seus lares e a agricultura, a pecuária e a pesca da região foram afetadas drasticamente. Somente no final de 2011 a restrição de acesso a cinco áreas evacuadas em um raio entre dez e vinte quilômetros da usina nuclear foi cancelada e os moradores puderam voltar aos seus domicílios.

De acordo com publicação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2011), a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) realizou um monitoramento da radiação a partir de 15 de março de 2011. Em um raio de um quilômetro da central nuclear observou-se a presença de iodo-131 e césio-137 no ar. A deposição de césio (césio-134 e césio-137) e iodo-131 no solo, monitorada em um raio de 80 quilômetros, foi detectada em 47 cidades. Fukushima foi a que apresentou a maior taxa de dose de raios gama. Houve restrição de distribuição e consumo de alimentos como peixe, leite *in natura*, verduras e legumes nas cidades de Fukushima, Kitaibaraki, Takahagi e Ibaraki.

Os níveis de radiação flutuaram drasticamente durante a crise. As autoridades japonesas foram criticadas por terem subestimado o perigo de *tsunamis* em diversos locais da costa do país. Relatórios da AIEA (CNEN, 2011) indicam que o projeto da central de Fukushima não foi apropriadamente planejado no sentido de proteger a usina contra os riscos de catástrofes naturais. Além do mais, as estimativas e os métodos de cálculo de eventos naturais deveriam ser constantemente atualizados.

Ao longo dos meses que se seguiram ao acidente, ocorreram alguns vazamentos de água radioativa de tanques no interior das instalações da usina de Fukushima Daiichi. Em agosto de 2013, cerca de 300 toneladas de água radioativa vazaram de um tanque, formando poças cujos níveis de radiação chegaram a 100 milisieverts (mSv) por hora, a mesma dose permitida a um trabalhador ao longo de cinco anos em média (a dose limite é de 20 mSv por ano, não podendo exceder a 50 mSv durante um ano). A companhia que administra a central de Daiichi admitiu a possibilidade de parte da água radioativa ter atingido águas subterrâneas e vazado para o Oceano Pacífico.

A extensão dos danos causados à saúde das pessoas e ao meio ambiente na região de Fukushima ainda está sendo estudada. O acidente radioativo, classificado no nível 7 – o mais grave no *status* de acidentes nucleares - foi o maior depois de Chernobyl. Um evento é classificado no nível 7 quando são liberadas mais que várias dezenas de milhares de terabecquerels de iodo-131. A Agência Japonesa de Segurança Nuclear e Industrial (NISA) estima que foi liberado o corresponde a 10% da quantidade de material radioativo liberado em Chernobyl (CNEN, 2011).

A energia elétrica produzida em reatores de fissão é a área de aplicação da energia nuclear com fins pacíficos que mais preocupa na questão de segurança. De acordo com Gonçalves (2011), a segurança nuclear é constantemente aperfeiçoada, com projetos e sistemas desenvolvidos cada vez mais seguros e confiáveis, no sentido de evitar falhas e acidentes; contudo, mesmo quando estudos demonstram que as instalações são seguras contra catástrofes naturais como terremotos, *tsunamis*, furacões, choques de aviões ou ataques terroristas, um evento do tipo *cisne negro* não está excluído. Como diz Piore (2011, p. 10), “projetistas nucleares não se dão ao luxo de prevenir qualquer tipo de catástrofe”. As lições de Fukushima não podem ser esquecidas.

A PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O ENSINO DA RADIOATIVIDADE NO NÍVEL MÉDIO

Neste capítulo apresentamos o desenvolvimento da proposta metodológica para o ensino da radioatividade a alunos da 3ª série do Nível Médio, com uma abordagem fundamentada nas perspectivas da Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) e História e Filosofia da Ciência (HFC). Entre as diversas metodologias ou formas de ensinar, optamos pela “sequência didática”, sobretudo pela maneira como as atividades podem se inter-relacionar. Acreditamos que a articulação entre as atividades propostas, a ordem em que são trabalhadas e a forma de o professor explorá-las não só favorecem o ensino e aprendizagem da radioatividade, mas também oportunizam a abordagem CTS e HFC com o intuito de formar cidadãos críticos e participativos das questões sociais que envolvem a ciência e a tecnologia.

Para a construção da proposta metodológica, consideramos fundamental analisar os livros didáticos de Física adotados pelas escolas da rede pública de ensino. Sabe-se que o livro de texto é visto pelos professores do Ensino Básico como uma ferramenta didática fundamental (RESQUETTI; DANHONI NEVES, 2007), e quando tal postura é adotada, os conteúdos propostos pelos autores acabam estabelecendo certa rotina na prática do professor, e até mesmo certa acomodação.

As obras analisadas fazem parte do conjunto aprovado pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) para o Ensino Médio, ano 2012. Entre as dez obras indicadas, julgamos interessante mostrar aquelas preferidas pelos professores do Núcleo Regional de Educação (NRE) de Maringá, Paraná. O NRE colocou à disposição a tabulação dos livros escolhidos em sessenta e três escolas. Com os dados obtidos elaboramos o quadro 2, que apresenta a relação das obras e o número de escolas que adotaram cada uma delas. A numeração referente aos livros didáticos na primeira coluna servirá como dado de referência.

TÍTULO DO LIVRO DIDÁTICO	AUTORES	EDITORA/ ANO DE PUBLICAÇÃO	Nº DE ESCOLAS QUE ADOTARAM O LIVRO DIDÁTICO
1. FÍSICA AULA POR AULA	Claudio Xavier; Benigno Barreto	FTD 2010	31
2. FÍSICA E REALIDADE	Aurélio Gonçalves Filho; Carlos Toscano.	Scipione 2011	18
3. FÍSICA – CIÊNCIA E TECNOLOGIA	Carlos Magno A. Torres; Nicolau Gilberto Ferraro; Paulo Antonio de Toledo Soares.	Moderna 2010	07
4. CURSO DE FÍSICA	Antônio Máximo Ribeiro da Luz; Beatriz Alvarenga Álvares.	Scipione 2011	02
5. FÍSICA	Gualter José Biscuola; Newton Villas Bôas; Ricardo Helou Doca.	Saraiva 2010	02
6. CONEXÕES COM A FÍSICA	Blaidi Sant'Anna; Gloria Martini; Hugo Carneiro Reis; Walter Spinelli.	Moderna 2010	01
7. FÍSICA EM CONTEXTOS - Pessoal – Social - Histórico	Maurício Pietrocola P. de Oliveira; Alexander Pogibin; Renata de Andrade Oliveira; Talita Raquel L. Romero.	FTD 2010	01
8. COMPREENDENDO A FÍSICA	Alberto Gaspar	Ática 2011	01
9. FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO	Kazuhito Yamamoto; Luiz Felipe Fuke	Saraiva 2010	0
10. QUANTA FÍSICA	Carlos Aparecido Kantor; Lilio Alonso Paoliello Junior; Luis Carlos de Menezes; Marcelo de Carvalho Bonetti; Osvaldo Canato Junior; Viviane Moraes Alves.	PD 2010	0

Quadro 2: Livros didáticos de Física do PNLD/2012 e o número de escolas do Núcleo Regional de Educação de Maringá-PR que adotaram cada um deles.

A análise das obras se concentrou nos seguintes critérios:

- A obra contempla ou não o tópico *radioatividade*?
- Quais são os conteúdos escolares apresentados pelos autores?
- Que enfoque é dado pelos autores: CTS? HFC? Ciência pura?
- As atividades propostas privilegiam a abordagem qualitativa ou quantitativa?
- A forma de abordagem está de acordo com as orientações dos PCNs?

O estudo nos mostrou como o tema é abordado pelos autores e nos auxiliou na elaboração da proposta.

Além das obras didáticas, realizamos uma sondagem entre dez professores de Física do Ensino Médio que atuam na rede pública de ensino do Paraná. Do grupo entrevistado, oito professores faziam parte do Programa de Desenvolvimento Educacional – PDE, ano 2012, e outro professor já havia participado do mesmo programa em 2007. A sondagem foi realizada por meio de um questionário. A pesquisa apresentada no capítulo 1º e as orientações de Moreira (2010) nos auxiliaram na elaboração dos itens. Escolhemos a forma de questões de eleição múltipla, com duas questões abertas no final. Quanto ao conteúdo, as perguntas classificam-se em três tipos: i) perguntas de *ação*, que dizem respeito a realizações do indivíduo; ii) perguntas de *intenção*, que refletem qual seria a ação do indivíduo diante de determinada situação; iii) perguntas de *opinião*, que envolvem a posição do respondente sobre o tema em questão.

O questionário visou verificar o que os docentes vivenciam e pensam a respeito do ensino da FMC, mais especificamente, da radioatividade, com as perguntas:

- Você já participou de curso de formação continuada que abordasse a FMC?
- É importante abordar a radioatividade no Ensino Médio?
- Você já ensinou o tema em suas aulas?
- Há dificuldades para a inserção do conteúdo em sala de aula?
- Há recursos didático-pedagógicos para abordagem do tema?

O questionário foi usado como instrumento para a coleta de opiniões e dados informativos, para que pudéssemos estruturar a sequência didática a partir das interpretações das respostas dos professores. Ao planejarmos as ações, consideramos as questões discutidas

por Sasseron (2010) relacionadas ao tema de nossa pesquisa: *Por que ensinar radioatividade na escola? O que ensinar nas aulas sobre a radioatividade? Quais os objetivos do ensino da radioatividade no Nível Médio?*

Após a elaboração das atividades, a sequência didática foi posta para validação pelo grupo de professores PDE-2012, que contribuíram para a sua reconstrução.

5.1. O REFERENCIAL TEÓRICO: ANÁLISE DE CONTEÚDO DE BARDIN

Optamos pela Análise de Conteúdo, de Bardin (1977), para classificar os resultados obtidos na análise dos livros didáticos de Física do PNLD/2012, como também as respostas dos professores ao questionário. Aplicamos o critério de categorias temáticas. Segundo Bardin (1977, p. 42, grifo do autor), a Análise de Conteúdo é

Um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter, por procedimentos, sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) destas mensagens.

De acordo com a autora, a análise de conteúdo é constituída de três fases: a) a pré-análise; b) a exploração do material; c) o tratamento dos resultados, a inferência e a interpretação. Em qualquer análise de conteúdo, a mensagem constitui o material; é o ponto de partida, o indicador sem o qual a análise não teria sentido.

A *pré-análise* é a fase de organização do trabalho, quando se faz a escolha dos documentos a serem analisados, a formulação da hipótese e do objetivo e a elaboração de indicadores que permitem fundamentar a interpretação final. Para a escolha do conjunto de documentos, faz-se inicialmente uma leitura flutuante para estabelecer contato com o material. Esse primeiro contato permite conhecer os textos e estabelecer as impressões e orientações para a análise. Uma vez definido o universo (gênero) de documentos a serem submetidos aos procedimentos analíticos, é necessário proceder à constituição de um *corpus* que implica, muitas vezes, escolhas, seleção e regras²⁰. A hipótese é elaborada à medida que a

²⁰ *Regra da exaustividade*: devem-se levar em conta todos os elementos do *corpus*, sem deixar de lado nenhum um dos elementos por esta ou aquela razão. *Regra da representatividade*: a análise pode ser realizada sobre uma amostra do material, desde que seja uma parte representativa do universo inicial. *Regra da homogeneidade*: os documentos devem ser homogêneos, ou seja, devem obedecer a critérios precisos de escolha. *Regra da pertinência*: os documentos devem ser adequados, de forma que correspondam ao objetivo da análise.

leitura dos documentos vai se tornando mais precisa; é uma formulação provisória que se propõe verificar recorrendo-se aos procedimentos de análise. O objetivo é a finalidade geral que se propõe atingir. Em função da hipótese já elaborada, escolhem-se o índice (tema) e a organização em indicadores (frequência de ocorrência) precisos e seguros.

A segunda fase da análise de conteúdo é a *exploração do material*. Consiste em operações de codificação em que os dados brutos são transformados sistematicamente e agregados em unidades, de forma a permitirem a descrição exata das características do conteúdo. Optamos pela *análise de conteúdo quantitativa categorial*. Esta forma de organização compreende três escolhas: das unidades, das regras de contagem e das categorias.

A escolha da unidade de registro corresponde à unidade de significação, ao núcleo de sentido. As unidades mais utilizadas são a palavra, o tema, o objeto ou referente, o personagem, o acontecimento e o documento. Para análise do material de pesquisa escolhemos o *tema* como unidade de registro. O passo seguinte é a escolha da regra de enumeração, ou seja, o modo de contagem (presença ou ausência, frequência, percentagem, estatística). É importante ressaltar que a unidade de registro – o que se conta –, é diferente da regra de enumeração – o modo de contagem. Na presente pesquisa optamos pela abordagem quantitativa fundamentada na *frequência* da aparição de determinados elementos na análise do conteúdo. Para completar o processo de exploração do material, enquadram-se as mensagens analisadas em *categorias*, que correspondem a grupos de elementos classificados sob um título genérico, levando-se em conta os caracteres que cada um deles tenha em comum com outros.

O objetivo primeiro da categorização é fornecer uma representação simplificada e organizada dos dados brutos. Os resultados brutos são tratados de modo a se tornarem significativos e válidos. Os quadros, diagramas, figuras e modelos resultantes da exploração do material expõem, de forma condensada, as informações fornecidas pela análise. A partir das informações obtidas, o analista tem condições de propor inferências e adiantar interpretações com relação aos objetivos.

5.2. SEQUÊNCIA DIDÁTICA: UMA METODOLOGIA DE ENSINO

Para Zabala (1998), uma sequência didática ou de ensino é uma proposta metodológica determinada por uma série de atividades ordenadas e articuladas de uma

unidade didática. Segundo o autor, um dos elementos que a identifica é o tipo de atividades que se propõe para exercer e, sobretudo, a maneira como são inter-relacionadas. Perguntamos então: como saber se as ações propostas atendem aos objetivos de ensino? Zabala explica que, para reconhecermos a validade de uma sequência didática, temos que observar se são contempladas atividades:

- que permitam determinar os *conhecimentos prévios* dos estudantes em relação aos conteúdos de aprendizagem;
- cujos conteúdos sejam *significativos* e funcionais para os alunos;
- que representem um *desafio alcançável* para os estudantes, que os faça avançar com a ajuda necessária;
- que provoquem *conflito cognitivo*, de forma a estabelecer relações entre os novos conteúdos e os conhecimentos intuitivos dos estudantes;
- que promovam uma *atitude favorável* do aluno, de modo que fiquem motivados para o estudo dos conteúdos propostos;
- que estimulem a *autoestima* do estudante, para que ele sinta que em certo grau aprendeu e que seu esforço valeu a pena;
- que ajudem o aluno a adquirir habilidades como o *aprender a aprender* e que lhe permitam tornar-se autônomo.

De acordo com Ricardo (2010, p. 37), “todas [...] inovações metodológicas almejam ampliar os objetivos do ensino das Ciências entre o professor e os alunos, de modo a romper com as práticas tradicionais de ensino para além do mero acúmulo de informações ou transposições mecânicas de técnicas de resolução de exercícios”. O autor propõe um ensino de Física contextualizado, de forma que os saberes a ensinar sejam tratados didaticamente a partir da ideia de problematização. Uma educação problematizadora busca estabelecer relações de diálogo. Nessa perspectiva, o papel do professor é fundamental. Sua atitude em sala de aula deve proporcionar a autonomia do aluno, a cooperação entre os grupos, a interação professor-aluno e o debate.

Entendemos que a aplicação de uma sequência didática a partir de um problema social relacionado ao tema que se pretenda ensinar possibilita ao professor não só identificar as concepções intuitivas dos educandos, mas também estabelecer um diálogo com a efetiva participação de todos. “A problematização consiste na construção de situações-problema que

irão estruturar as situações de aprendizagem, dando-lhes um significado percebido pelos alunos” (RICARDO, 2010, p. 42). Cumpre lembrar que a situação-problema não se resume em meras ilustrações ou generalizações do cotidiano, mas compreende a forma como o professor explora a situação. Os aspectos desconhecidos e problemáticos para o aluno devem ser destacados com vista a que ele se situe diante da necessidade de adquirir um conhecimento que ainda ele não possui e, ao mesmo tempo, que ele vislumbre a possibilidade de alcançá-lo.

O debate entre o professor e os alunos em torno da situação-problema irá direcionar a aplicação das atividades seguintes. Surgirão questões como quais os conceitos físicos fundamentais para a compreensão do problema proposto, se os conteúdos são significativos para o aluno e como manter uma atitude favorável dos estudantes, de modo que fiquem motivados para aprender. As discussões favorecem ao professor reconhecer o percurso dos conteúdos a ensinar, sobretudo o que é essencial e relevante para a compreensão do problema exposto, como também o grau de aprofundamento que deverá ser adotado.

Todavia, ao identificar os conceitos e teorias-chaves, o professor tem que saber construir um ambiente de aprendizagem que contribua para um ensino de Física contextualizado, de modo a tornar os conteúdos significativos para o aluno. Para isso, propomos atividades que contemplem os aspectos científicos, sociais, tecnológicos e históricos que envolvam o tema, como forma de despertar a atitude favorável dos estudantes e a iniciativa de perguntar e de responder. A interação professor-aluno será produtiva desde que o educando não tenha receio em perguntar, formular hipóteses ou expor suas ideias. A fim de dar espaço ao debate e sentido ao estudo da radioatividade, optamos pelo enfoque da História e Filosofia da Ciência (HFC) e do movimento Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS), como forma de proporcionar um ensino contextualizado do tema.

Durante as discussões em sala de aula, as contribuições dos grupos e as conclusões obtidas permitem ao professor introduzir os conceitos, as leis, os modelos e os princípios físicos envolvidos. É importante realizar generalizações das conclusões e sínteses, de modo a aprofundar a compreensão dos conteúdos. Entendemos que a resolução de exercícios diversificados permite ao educando aplicar os conteúdos físicos de modo a contribuir com a construção de sua aprendizagem.

Avaliar o aluno, coletiva e individualmente, é imprescindível não só para o professor, como também para o aluno. Para o professor, a avaliação deve ser usada como um instrumento de aprendizagem, de forma que contribua para o aluno avançar na construção de novos saberes; e para o aluno, a avaliação é importante porque ele precisa refletir sobre os

conteúdos abordados e perceber se realmente aprendeu, mas principalmente, sentir que seu esforço valeu a pena. Propomos, então, a avaliação contínua, aplicada durante o desenvolvimento da sequência didática. Entendemos que as atividades desenvolvidas em sala de aula devem proporcionar situações que permitam ao professor verificar se os alunos estão compreendendo os conteúdos e, sobretudo, se os objetivos de ensino estão sendo atingidos.

Pelas razões apresentadas, reiteramos que um projeto de ensino deve ser bem definido, de forma que envolva os conteúdos e as metodologias e atenda às intenções educacionais. É fundamental definir o número de aulas que será necessário para o desenvolvimento da sequência didática, bem como escolher as estratégias e os recursos tecnológicos e audiovisuais, a fim de promover aulas dinâmicas no processo de ensino e aprendizagem. O professor deve planejar as atividades de modo a dar espaço para a liberdade intelectual dos alunos, estabelecer tarefas e criar regras de conduta que permitam aos grupos trabalharem de forma harmoniosa. Neste sentido, entendemos que inter-relacionar as atividades aplicadas em sala de aula possibilita a construção da aprendizagem, desde que tenhamos sempre bem claros os pontos de partida e de chegada.

5.3. A RADIOATIVIDADE NOS LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA DO PNLD/2012: ANÁLISE DAS OBRAS DIDÁTICAS

Optamos por tomar a obra *Física das Radiações*, do Ensino Superior, das autoras Emico Okuno e Elisabeth Yoshimura (2010), como referência dos conhecimentos científicos aceitos consensualmente pela comunidade científica. O texto, que apresenta uma linguagem agradável e didática, é tomado como parâmetro para a análise dos conteúdos contemplados nos livros didáticos de Física do PNLD/2012.

Para organizar a classificação dos conteúdos escolares apresentados nas obras didáticas, pesquisamos quais são os tópicos abordados por Okuno e Yoshimura (2010) com relação à radioatividade que consideramos básicos para o ensino no Nível Médio. Os conteúdos selecionados são os seguintes: (i) o conceito de átomo e o modelo atômico didático; (ii) o núcleo atômico; (iii) isótopos e radioisótopos; (iv) radioatividade: emissões alfa, beta, gama; (v) decaimento radioativo; (vi) meia-vida radioativa; (vii) fissão nuclear; (viii) reação em cadeia; (ix) energia nuclear: o reator de fissão e a bomba atômica.

O exame dos livros didáticos se concentrou nas dez obras selecionadas pelo PNLD/2012, expostas no quadro 2. Os exemplares analisados referem-se ao livro do professor. Apresentamos a análise das obras iniciando com uma descrição geral e, na sequência, as características observadas. Apresentamos também a percentagem de escolas abrangidas pelo Núcleo Regional de Educação de Maringá que adotaram cada uma das obras.

(1) *FÍSICA AULA POR AULA*

Volume 3, ano 2010, 384 p.

Autores: Claudio Xavier e Benigno Barreto.

Editora: FTD

Física Aula por Aula é a obra escolhida pelo maior número de escolas do Núcleo Regional de Educação (NRE) de Maringá, representando 49,2% do total. O volume 3 está estruturado em seis unidades, divididas em vinte capítulos. A unidade 6 é dedicada à Física Moderna (p. 321-373), em três capítulos. O capítulo 18 aborda a Teoria da Relatividade (p. 322-343), o capítulo 19 trata da Física Quântica (p. 344-3351) e o capítulo 20 apresenta a Física Nuclear (p. 352-367).

Xavier e Barreto dedicam dezesseis páginas à Física Nuclear. O capítulo é aberto com o seguinte questionamento: “A energia nuclear é muito conhecida por conta das explosões atômicas deflagradas durante a Segunda Grande Guerra. Mas será que toda essa energia só pode ser utilizada para fazer mal à sociedade?”. Na sequência, são abordados os seguintes tópicos: o núcleo atômico, decaimento nuclear, fissão nuclear, energia nuclear e sua utilização, o lixo atômico e os riscos ambientais.

O modelo atômico didático é abordado brevemente no início do livro, na introdução à Eletrostática. No capítulo dedicado à Física Nuclear, a descrição do núcleo atômico e da estrutura da matéria é apresentada de modo sucinto. Na sequência, os autores abordam os conceitos de força nuclear forte e força nuclear fraca. A apresentação do conceito de radiação nuclear é muito limitada e as emissões alfa, beta e gama são citadas apenas como exemplos, ou seja, a forma como foram descritas não contribui para a compreensão dos fenômenos. As descrições de decaimento nuclear e fissão nuclear são um pouco mais extensas, porém o entendimento desses processos fica comprometido, uma vez que os autores não explicam com suficiente clareza o fenômeno da radiação nuclear. Embora o termo isótopo seja mencionado,

os autores não abordam o conceito. Ao abordarem a reação em cadeia, Xavier e Barreto explicam o processo de fissão que ocorre nos reatores nucleares e na bomba atômica. O conceito de meia-vida não é apresentado na obra.

Quanto ao enfoque da História e Filosofia da Ciência (HFC), nota-se que está praticamente ausente. Os autores apenas citam, brevemente em um parágrafo, que Becquerel realizou as primeiras observações do fenômeno de radioatividade ao colocar uma chapa fotográfica no escuro com sais de urânio, e que o casal Curie realizou estudos notáveis na área. Acrescentam que os três cientistas receberam o Prêmio Nobel de Física. Embora o livro apresente textos complementares que abordam a História e Filosofia da Física Moderna e Contemporânea e contribuições de cientistas, não há apresentação de leitura a respeito da Física Nuclear ou da radioatividade.

Xavier e Barreto privilegiam a ênfase na Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) ao abordarem o tópico “A energia nuclear e sua utilização”. Para exemplificar os riscos e irresponsabilidades no uso dessa fonte, citam as experiências desastrosas com as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki e os acidentes radioativos de Chernobyl e de Goiânia. Ao discutirem o aspecto social e ambiental da energia nuclear para a produção de energia elétrica, os autores descrevem o processo de funcionamento do reator de fissão e de uma usina nuclear, comentam sobre a utilização de energia nuclear no Brasil e o funcionamento das usinas de Angra 1, 2 e 3. A ênfase CTS aparece ainda na apresentação dos tópicos “A medicina e a indústria brasileira” e “O lixo atômico e os riscos ambientais”, quando os autores discutem sobre os benefícios da utilização da energia nuclear e os riscos que os resíduos radioativos representam para o meio ambiente.

Os autores apresentam três exercícios resolvidos como exemplos de aplicação dos conteúdos: um com ênfase na Ciência pura e dois com enfoque CTS. Com relação às atividades propostas no capítulo, os autores apresentam os quadros “Elabore as resoluções”, “Elabore em casa” e “Em frente ao Enem”, compreendendo vinte e seis questões no total. Constatamos que, das vinte e seis questões, doze abordam os conhecimentos científicos sobre a radioatividade, dez apresentam a ênfase CTS e apenas duas enfocam a HFC. A questão 03, da página 355, e a 02, da página 356, embora enfoquem a FMC, estão fora do contexto, uma vez que não abordam a Física Nuclear. Desse modo, consideramos que são vinte e quatro as questões que tratam da radioatividade no capítulo. Entre estas, prevalecem os exercícios qualitativos; cinco são quantitativos, e estes são contextualizados e interessantes. A questão 1 (p. 355) envolve a HFC ao relatar a descoberta da radioatividade, porém menciona que

Becquerel identificou que os “raios urânicos” eram constituídos de três partes distintas e que, mais tarde, foram chamadas de radiações alfa, beta e gama, quando se sabe que tais radiações foram detectadas pela primeira vez por Rutherford e Villard, conforme relatamos no capítulo 3º.

A obra apresenta o quadro “Quer saber?”, com a pergunta “O que é urânio enriquecido?”, e propõe uma atividade com resposta individual, com o intuito de os alunos discutirem sobre as políticas internacionais de produção de urânio enriquecido. No final do capítulo, os autores apresentam o quadro “De volta ao começo”, para que os alunos reflitam sobre a questão de abertura e fechem as discussões sobre o tema com base nos conceitos estudados.

Ao fazermos a correspondência entre os conteúdos apresentados na obra de Xavier e Barreto e os de Okuno e Yoshimura (2010), esta última tomada como parâmetro para a análise dos livros didáticos, entendemos que o capítulo dedicado à Física Nuclear apresenta os conteúdos científicos de modo muito breve, deixando lacunas que dificultam a compreensão do fenômeno de radioatividade. Com relação às atividades e exercícios propostos que envolvem os conhecimentos científicos, julgamos que são criativos e de nível adequado aos estudantes.

Quanto às orientações dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), entendemos que Xavier e Barreto atendem preferencialmente ao enfoque nas relações Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) quando apresentam os conhecimentos científicos, deixando à margem a ênfase na História e Filosofia da Ciência (HFC); já no enfoque dos exercícios propostos, notamos que há um equilíbrio entre a Ciência pura e a perspectiva CTS.

(2) *FÍSICA E REALIDADE*

Volume 3, ano 2011, 200 p.

Autores: Aurélio Gonçalves Filho e Carlos Toscano.

Editora: Scipione

Física e Realidade ocupa a segunda colocação na preferência dos professores do Núcleo Regional de Educação de Maringá, correspondendo a 28,6% do total de escolas. O terceiro volume compreende cinco capítulos, divididos entre os temas Eletricidade, Magnetismo e Física Moderna. O capítulo 5º apresenta “Tópicos de Física Moderna” (p. 160-

183), sendo abordados os seguintes tópicos: um novo paradigma; a Física Moderna que podemos encontrar no lazer, na cultura e no entretenimento; da bomba atômica à radioterapia e o núcleo atômico.

Na introdução do capítulo 2º, que versa sobre o conceito de campo elétrico, tensão e o modelo de corrente elétrica, os autores apresentam um relato histórico das primeiras ideias a respeito da estrutura da matéria. A evolução histórica dos modelos atômicos de Thomson e Rutherford é apresentada com uso de várias imagens, vindo a seguir a abordagem do núcleo atômico e do modelo atômico didático. A estrutura da matéria é retomada com uma descrição mais detalhada.

No capítulo 5º, dedicado à Física Moderna, os autores abrem a seção “Da bomba atômica à radioterapia” (p. 169-173) com a questão: “Como é possível existir estabilidade no núcleo atômico se os prótons que o compõem repelem-se eletricamente?”. Gonçalves Filho e Toscano retomam os modelos atômicos descritos no capítulo 2º e mencionam o modelo de Bohr, porém não o explicam. Descrevem brevemente o experimento realizado por Rutherford para comprovar que o átomo possui um núcleo, e introduzem o conceito de força nuclear. Comentam sobre a radiação emitida pelo urânio, apresentando uma breve definição do processo de desintegração de um núcleo. Atribuem a descoberta da radioatividade a Becquerel e citam Marie Curie apenas como criadora do termo “radioativo”.

Na sequência, Gonçalves Filho e Toscano comentam sobre o desconhecimento a respeito dos efeitos nocivos de elementos radioativos na época em que foram descobertos, e os tratamentos radioterápicos utilizados atualmente no tratamento de câncer. Os autores, ao explicarem o que é meia-vida de uma amostra radioativa, descrevem a utilidade de alguns medicamentos radiofármacos. Para exemplificar a relação entre radioatividade e tempo, citam a datação com carbono-14 para estimar a data de morte de objetos constituídos por materiais que contêm carbono. Apresentam outros exemplos de elementos que possuem meia-vida curta, como o iodo-123 e o samário-153, utilizados em exames e tratamentos médicos, o que exige um bom planejamento para que os produtos sejam bem utilizados enquanto ainda estiverem ativos. Os autores comentam o acidente de Goiânia com o césio-137, cuja amostra, por possuir meia-vida média de 30 anos, tornou-se potencialmente perigosa por muito tempo. Gonçalves Filho e Toscano complementam a seção com o quadro “Algo +”, com a descrição do aparelho de ressonância magnética.

A seção “O núcleo atômico” (p. 174-178) é iniciada com o questionamento “O que pode alterar a instabilidade do núcleo de um átomo?”. Os autores abordam brevemente os

experimentos realizados por Rutherford e comentam sobre a grande quantidade de energia liberada pelas bombas atômicas detonadas em Hiroshima e Nagasaki. Na sequência, explicam como ocorrem a fissão nuclear e a reação em cadeia. Gonçalves Filho e Toscano não descrevem as emissões alfa, beta e gama, não explicam o processo de decaimento radioativo (apenas apresentam uma breve definição) e não abordam o conceito de isótopo. Complementam a seção com a descrição de fusão nuclear e a comparam com o processo inverso de fissão.

Notamos que os autores não apresentam exercícios resolvidos, tradicionalmente presentes nos livros didáticos, como exemplos de aplicação dos conceitos físicos. Quanto aos exercícios propostos, encontramos, no 2º capítulo, dez questões relativas aos modelos atômicos. Entre essas, sete apresentam o enfoque qualitativo e três o formalismo matemático. Ainda, dentre as dez questões, quatro abordam a HFC e seis são aplicações dos conceitos físicos. No capítulo 5º, dedicado à Física Moderna, apenas dez exercícios propostos abordam os demais conteúdos analisados. Dentre as dez questões, seis são aplicações do formalismo matemático e quatro são qualitativas. Nove dos exercícios enfocam a Ciência pura e um a perspectiva CTS. Notamos ainda que três questões referem-se a conteúdos que os autores não explicaram, como o processo de obtenção de energia elétrica em usinas nucleares, o conceito de raios gama e o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio.

Observamos que os autores apresentam algumas noções sobre o fenômeno de radioatividade, mas sem aprofundamento. Comparando-se os conteúdos apresentados na obra com aqueles de Okuno e Yoshimura (2010) tomados como parâmetro, identificamos algumas lacunas que prejudicam o ensino-aprendizagem do tema. Com relação às orientações dos PCNs notamos que prevalece a ênfase CTS na abordagem dos conhecimentos científicos, com destaque de algumas aplicações da radioatividade na medicina, mas não se abordam suas aplicações na indústria, agricultura e produção de energia elétrica. O enfoque na História e Filosofia da Ciência (HFC) aparece brevemente ao longo dos textos. Quanto ao enfoque dos exercícios propostos, os autores privilegiam a Ciência pura.

(3) *FÍSICA - CIÊNCIA E TECNOLOGIA*

Volume 3, ano 2010, 360 p.

Autores: Carlos Magno A. Torres; Nicolau Gilberto Ferraro; Paulo Antonio de Toledo Soares.

Editora: Moderna

A obra *Física - Ciência e Tecnologia* é a terceira na lista entre as mais escolhidas pelas escolas do Núcleo Regional de Educação de Maringá, representando 11,1% do total. O volume 3 está estruturado em duas unidades, divididas em oito capítulos. A unidade II é dedicada à Física Moderna e Contemporânea (p. 226-336), com 111 páginas. O capítulo 5º aborda a Relatividade Especial (p. 226-251), o capítulo 6º apresenta a Física Quântica (p.252-281), o capítulo 7º discute a Física Nuclear (282-306) e, por fim, o capítulo 8º trata da Tecnologia das Comunicações (p. 307-336).

O modelo atômico de Bohr é discutido no capítulo 6º, dedicado à Física Quântica. Os autores apresentam a Física Nuclear em vinte e cinco páginas. Os tópicos abordados relativos à radioatividade são: o núcleo atômico, radioatividade, lei do decaimento radioativo, fissão nuclear, rejeito radioativo e acidentes nucleares. No início do capítulo é apresentada a imagem da explosão de uma bomba de hidrogênio lançada pelos Estados Unidos da América em 1954, com questionamentos sobre massa e energia. Na introdução, os autores discorrem brevemente sobre a dimensão do núcleo atômico, os processos de rompimento do núcleo e as tecnologias para aproveitamento de fontes de energia. Citam Becquerel como descobridor da radioatividade e apresentam um breve relato sobre o desenvolvimento e pesquisas em Física Nuclear.

Torres et al. descreverem o núcleo atômico, explicam as emissões alfa, beta e gama, e o que são isótopos (brevemente), a massa nuclear e as dimensões do núcleo. Ao apresentarem o fenômeno de radioatividade, retomam a questão do decaimento alfa e beta e relatam as contribuições de Becquerel, do casal Curie e de Rutherford, com destaque a Marie Curie. Os autores abordam a lei do decaimento radioativo, os conceitos de meia-vida, vida média e a relação matemática entre essas grandezas. Explicam o que é a fissão nuclear, porém não descrevem os processos de reação em cadeia autossustentada e explosiva.

O enfoque CTS aparece no quadro “Aplicação tecnológica: a radioatividade tecnológica na medicina”. Os autores discutem os tratamentos radioterápicos e os danos colaterais, os diagnósticos médicos que usam as propriedades de substâncias radioativas e os exames realizados com aparelhos de tomografia por emissão de pósitrons (TEP). No final do quadro, é apresentada uma atividade para que os alunos citem outras aplicações tecnológicas da radioatividade na sociedade, o que favorece a discussão em grupo sobre o assunto. O quadro “O que diz a mídia: Inpe estuda energia por fusão termonuclear”, refere-se às

pesquisas realizadas por cientistas brasileiros do Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) na área de energia nuclear por fusão termonuclear.

A ênfase CTS é também notada no tópico “Rejeito radioativo”, quando os autores discutem a questão do armazenamento de resíduos radioativos. No tópico “Acidentes nucleares”, citam os acidentes ocorridos nos reatores das usinas de Three Mile Island, nos Estados Unidos da América, e o de Chernobyl, na Ucrânia, e propõem uma atividade para os alunos pesquisarem e discutirem em grupo a respeito das vantagens e desvantagens do uso da energia nuclear.

Quanto aos exercícios propostos, a obra apresenta três exemplos de aplicação resolvidos e propõe dezoito exercícios nos quadros “Resolva em seu caderno”, diferenciando os que consideram fundamentais daqueles de fixação. Contando-se as questões propostas sobre radioatividade no final dos quadros “Aplicação tecnológica” e “Acidentes nucleares”, somam-se vinte exercícios no total. Observamos que prevalecem atividades com abordagem pautada no formalismo matemático, compreendendo treze exercícios contra sete questões qualitativas. Dentre as vinte questões, dezessete apresentam ênfase na Ciência pura, duas enfocam a perspectiva CTS e apenas uma apresenta o enfoque HFC.

Ao associarmos os conhecimentos científicos escolares apresentados por Torres et al. com os parâmetros tomados para comparação da obra de Okuno e Yoshimura (2010), observamos que os autores abordam os conteúdos que consideramos fundamentais para o ensino do tema. Os exercícios propostos, que enfocam preferencialmente a Ciência pura, apresentam nível adequado para os alunos do Ensino Médio, porém a criatividade é muito modesta e está ausente na maioria das questões formais. Entendemos que a falta desta característica torna os exercícios descontextualizados, cansativos e desmotivadores para o aluno, pois prevalece a aplicação do formalismo matemático. Com relação ao enfoque dos conteúdos científicos, observamos a ênfase na Ciência pura e CTS, enquanto a perspectiva HFC aparece timidamente ao longo do capítulo.

(4) *CURSO DE FÍSICA*

Volume 3, ano 2011, 448 p.

Autores: Antônio Máximo Ribeiro da Luz e Beatriz Alvarenga Álvares.

Editora: Scipione

A obra *Curso de Física*, de Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga, foi escolhida por duas escolas do Núcleo Regional de Educação de Maringá, representando 3,2% das sessenta e três instituições. O terceiro volume está estruturado em quatro unidades, divididas em nove capítulos. A unidade 4 refere-se à Física Contemporânea (p. 333-395), apresentando a Teoria da Relatividade (p. 334-347), a Física Quântica (p. 348-374) e a Nova Física (p. 375-391). A unidade é complementada com os apêndices “Relatividade especial: notas sobre o conceito de massa, o conceito de massa de um feixe de luz, o paradoxo dos gêmeos” e “Física Quântica: o modelo atômico de Bohr” (p. 394-395).

A obra não apresenta capítulo específico sobre a Física Nuclear, mas na unidade 3 do terceiro volume, dedicada ao Eletromagnetismo, é apresentado o tópico “o espectro eletromagnético”, em que os autores descrevem as radiações eletromagnéticas. Os autores citam as radiações alfa, beta e gama emitidas pelo núcleo do átomo e os danos que podem causar às células animais, e ilustram em uma figura o poder de penetração dessas radiações. A abordagem é breve, compreendendo meia página. Não obstante, no final do capítulo 8º do primeiro volume, em que os autores abordam a conservação da energia, é apresentado “Um tópico especial para você aprender um pouco mais”. A seção apresenta sucintamente o conceito de fissão nuclear e de reação em cadeia. Para exemplificar, os autores citam as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki. O processo de reação em cadeia controlada é mencionado, mas não é explicado. Entendemos que o tópico visa apenas apresentar aos estudantes uma ideia do que vem a ser a energia nuclear, uma vez que o capítulo versa sobre a conservação da energia, mas sem aprofundamento do conteúdo.

Ao compararmos os conteúdos apresentados pelos autores do *Curso de Física* com os parâmetros adotados da obra de Okuno e Yoshimura (2010), entendemos, no que diz respeito às radiações nucleares, que os conhecimentos abordados não contribuem para que o professor realize satisfatoriamente o ensino do tema em sala de aula. Como a abordagem é mínima, consideramos que o tema radioatividade não é apresentado por Máximo e Alvarenga na obra citada.

(5) *FÍSICA*

Volume 3, ano 2010, 368 p.

Autores: Gualter José Biscuola, Newton Villas Bôas e Ricardo Helou Doca.

Editora: Saraiva

O livro didático *Física* foi adotado por duas escolas do Núcleo Regional de Educação de Maringá, correspondendo a 3,2% do total de escolas. O volume 3 está estruturado em cinco unidades, divididas em quatorze capítulos. A unidade IV aborda a Física Moderna (p. 286-330) nos capítulos 12 e 13. O capítulo 12 apresenta “Noções de Física Quântica” (p. 288-311), e o 13, a “Relatividade e outras noções” (p. 312-330). O modelo atômico de Bohr é discutido em dois momentos: no final do capítulo de Física Quântica e no tópico sobre a teoria de De Broglie, no capítulo 13. Os autores não abordam a Física Nuclear ou a radioatividade.

(6) *CONEXÕES COM A FÍSICA*

Volume 3, ano 2010, 416 p.

Autores: Blaidi Sant’Anna, Gloria Martini, Hugo Carneiro Reis e Walter Spinelli.

Editora: Moderna

A obra *Conexões com a Física* foi escolhida por uma escola do Núcleo Regional de Educação de Maringá, representando 1,6% das sessenta e três escolas. O terceiro volume está organizado em cinco unidades, apresentando dezenove capítulos. A unidade 5 versa sobre a Física Moderna e Contemporânea (p. 330-397), e está organizada em quatro capítulos, distribuídos em sessenta e oito páginas. Os capítulos estão divididos entre os temas “Fenômenos que a Física Clássica não explicou”, “As teorias da Relatividade”, “Elementos da Física Quântica” e “Desafios da Física no século XXI”.

O núcleo atômico é discutido no capítulo “Desafios da Física no século XXI” (p. 376), no tópico “A busca pelo átomo”. Os autores citam os modelos atômicos de Dalton, Thomson e Rutherford, mas não apresentam o modelo atômico de Bohr. Descrevem o decaimento beta, força nuclear fraca e força nuclear forte. Percebe-se que o intuito dos autores é explicar algumas partículas elementares.

Conexões com a Física não dedica capítulo à Física Nuclear ou à radioatividade, porém o “Suplemento para o professor” (p. 1-200), no final do livro, traz excelentes elementos de apoio ao trabalho docente em sala de aula. Na seção sobre a Relatividade Restrita, no capítulo 17, os autores sugerem ao professor consultar o suplemento 12 (p.110-112) para obter informações sobre as duas principais aplicações de equivalência entre massa e energia - a fissão e a fusão -, caso opte por apresentar este tópico. O conteúdo não faz parte do

livro do aluno, portanto é uma opção do professor abordá-lo ou não. Ao longo do suplemento 12, Sant’Anna et al. explicam a fissão nuclear, apresentam o esquema de funcionamento de uma usina termonuclear, discutem o problema dos dejetos radioativos e comentam sobre a reação nuclear não controlada das bombas atômicas detonadas em Hiroshima e Nagasaki. Sugerem ao professor debater com os alunos os meios viáveis de produzir energia, levando-se em conta o aquecimento global e a tecnologia nuclear. O texto tem enfoque CTS e visa contribuir com a cultura científica do estudante. Não obstante, optamos por considerar ausente o tema *radioatividade* na obra *Conexões com a Física*, visto que a abordagem do conteúdo é apresentada como opcional pelos autores, no suplemento final do livro, e não consta no livro didático do aluno.

(7) *FÍSICA EM CONTEXTOS: PESSOAL – SOCIAL – HISTÓRICO*

Volume 3, 2010, 528 p.

Autores: Maurício Pietrocola, Alexander Pogibin, Renata de Andrade Oliveira e
Talita Raquel Luz Romero.

Editora: FTD

Física em Contextos – Pessoal – Social - Histórico, obra de Pietrocola et al., foi adotada por uma escola do Núcleo Regional de Educação de Maringá, o que corresponde a 1,6% das escolas de Ensino Médio da região. O volume 3 está dividido em três unidades, compreendendo quatorze capítulos. A unidade 3 – “Radiação e Matéria” - aborda a Física Moderna (p. 338-499), com cento e sessenta e duas páginas.

O capítulo 12 apresenta “A Natureza da Luz” (p. 338-395). Os autores tratam das ideias relacionadas à velocidade e natureza da luz e inserem seções sobre a Teoria da Relatividade e Física Quântica, entre outras. O capítulo 13 aborda a “Estrutura da Matéria” (p. 396-452), e o 14, “Partículas Elementares” (p. 453-499). O tema *radioatividade* está inserido no capítulo 13, sendo apresentadas as seções: estrutura da matéria, o átomo, os modelos atômicos de Thomson e Rutherford, o modelo atômico de Bohr, núcleo atômico, decaimento radioativo, fissão nuclear e a produção de energia. A abordagem dos tópicos é contextualizada. Os autores chamam a atenção do professor, com notas destacadas em vermelho nas bordas das páginas, com o intuito de orientá-lo no desenvolvimento dos trabalhos em sala de aula. As notas de “lembretes” servem para reforçar as descrições

matemáticas ou apresentar alguma observação. Ao longo do texto são apresentados os quadros “Por dentro do conceito”, com o objetivo de detalhar alguns conceitos relevantes.

Ao apresentarem o modelo atômico de Bohr, Pietrocola et al., comentando os problemas do modelo de Rutherford relacionados à estabilidade do núcleo, afirmam que este precisaria ser aprimorado. Introduzem, então, o modelo proposto por Bohr com uma exposição bem detalhada sobre o tema, acrescida de exercícios e aplicações. Na apresentação da seção sobre o núcleo atômico, os autores descrevem a estabilidade nuclear, iniciando com uma revisão dos modelos de Rutherford e Bohr. Propõem a atividade prática “Explorando a situação”, para introduzir o conceito de força nuclear forte. Na sequência, descrevem a fusão nuclear. Os autores explicam as interações nucleares entre nêutrons e prótons, núcleos estáveis e instáveis, e propõem alguns exercícios.

Pietrocola et al. explicam, com detalhes, os processos de decaimento alfa, beta e gama, as radiações emitidas, a lei do decaimento radioativo e o conceito de meia-vida. Introduzem o quadro “Por dentro do conceito”, com o objetivo de detalhar os conceitos de isótopos e de neutrino do elétron. Ao abordarem o decaimento radioativo, citam as preocupações de cientistas no final do século XIX com respeito ao núcleo do átomo e as ideias de Lavoisier que, em parte, podem ser usadas para uma reflexão. Segundo os autores, a famosa frase “na natureza tudo se transforma” pode ser aplicada no caso dos núcleos instáveis que se transformam em outros núcleos.

A perspectiva HFC aparece quando os autores comentam os trabalhos de Röntgen na descoberta dos raios X, físico cujos estudos mobilizaram a investigação sobre as radiações. Atribuem a descoberta da radioatividade a Becquerel e mencionam as contribuições do casal Curie nas pesquisas com materiais radioativos. Dedicam a seção “O cientista no tempo e na história” à Marie Curie, apresentando uma breve biografia e o contexto social da época que a motivaram a pesquisar sobre a radioatividade.

A abordagem CTS é destacada nas duas seções “Técnica e tecnologia”. Os autores relatam sobre cirurgias sem cortes, realizadas por pesquisadores brasileiros em parceria com americanos, com o uso da radiação gama no tratamento do transtorno obsessivo-compulsivo. O quadro “datação por carbono-14” descreve a polêmica em torno da idade das pinturas encontradas nas pedras do Parque Nacional Serra da Capivara, no Piauí, e a importância do processo de datação de objetos antigos por meio do carbono-14.

As perspectivas CTS e HFC são notadas também na seção “Fissão nuclear e a produção de energia”. Pietrocola et al. comentam sobre as lembranças negativas que trazem as

bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki, e os acidentes radioativos de Chernobyl e Goiânia. Os autores citam a desconfiança das pessoas relacionadas à radiação, cujos reflexos foram sentidos durante a construção das usinas nucleares de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. Para que o aluno possa formar opinião sobre a questão do uso da energia nuclear para produção de energia elétrica, os autores apresentam algumas informações a esse respeito. Explicam a diferença entre fusão e fissão nuclear e, na sequência, apresentam um texto sobre a descoberta da fissão nuclear pelos alemães Hahn e Strassmann²¹. Citam também o desenvolvimento da teoria da fissão por Bohr e Wheeler.

Os autores, ao descreverem as reações de fissão do urânio, abordam o mecanismo da fissão nuclear controlada para produção de energia elétrica. Apresentam o esquema de funcionamento de uma usina nuclear explicando, com detalhes, a função do reator, e citam a produção de energia gerada nas usinas Angra I e II. No tópico “O contexto tecnológico e social” comentam a polêmica sobre o desenvolvimento de pesquisas nucleares, em virtude das diversas guerras que ocorreram desde o século XX. Os autores expõem os argumentos favoráveis e contrários ao uso de energia nuclear para a produção de energia elétrica, os riscos e os cuidados na sua utilização. Complementam a seção com o quadro “Por dentro do conceito: enriquecimento do urânio”, quando descrevem as etapas para aumentar a quantidade do isótopo de urânio e a finalidade do material coletado.

Pietrocola et al. apresentam, no final do capítulo, a seção “Outras atividades”, e propõem a atividade “Pesquise, proponha e debata: anjos e demônios da Física Nuclear”. Os autores sugerem o desenvolvimento de uma pesquisa para reunir fatos e argumentos, para o professor debater com os alunos as consequências que o conhecimento da estrutura do átomo ocasionou no século XX. Dividem o texto em duas partes – “a face dos demônios” e “a face dos anjos”-.

Na primeira parte - “a face dos demônios” -, os autores relatam as declarações do físico Segrè sobre um artigo publicado por Rutherford a respeito dos primeiros estudos sobre as partículas alfa. Introduzem uma citação do próprio Segrè sobre a reação do físico Fermi, logo depois da primeira explosão nuclear na cidade de Los Alamos, nos Estados Unidos da América, para mostrar que em 1945 os cientistas ainda procuravam entender melhor a estrutura da matéria. Relatam que, após o teste nuclear, os cientistas ficaram divididos entre lançar ou não as bombas atômicas no Japão. Os autores sugerem, então, que os alunos

²¹ Embora a explicação da fissão nuclear seja atribuída a Hahn e Strassmann, foi a física austríaca Lize Meitner, juntamente com o seu sobrinho, o químico Otto Frisch, quem decifrou o processo de fissão, conforme exposto no capítulo 3º.

organizem uma pesquisa que inclua o princípio da bomba atômica, as pessoas envolvidas no desenvolvimento do artefato, as razões declaradas por físicos, autoridades e políticos, ações e reações dessas pessoas antes e após o lançamento das bombas e os rumos das pesquisas nucleares antes e depois da Segunda Guerra Mundial.

Na segunda parte do texto - “A face dos anjos” -, os autores comentam sobre o uso pacífico da energia nuclear para obtenção de energia elétrica. Apresentam uma citação do físico americano Arthur Compton em que este descreve o primeiro teste de um reator nuclear com uma reação em cadeia autossustentável. Os autores sugerem que os alunos complementem a pesquisa da parte I, organizando informações sobre o funcionamento e os tipos de reatores nucleares, o acidente de Chernobyl, a produção de energia no Brasil, as aplicações das pesquisas nucleares na medicina, na agricultura e na exploração do petróleo, o lixo nuclear e o acidente de Goiânia.

Quanto aos exercícios propostos, analisamos apenas aqueles que se referem aos conteúdos escolhidos como parâmetro para a análise do *saber a ensinar* presente nos livros didáticos, conforme apresentamos no início deste capítulo. Os autores apresentam doze exercícios resolvidos como exemplos para o aluno acompanhar as estratégias de resolução e propõem dez exercícios considerados fáceis. No tópico “Exercícios propostos: pense um pouco mais”, são apresentadas questões relativas ao capítulo 13 do livro, das quais quatorze envolvem os conteúdos tomados como referência para análise, retiradas da obra de Okuno e Yoshimura (2010). Contando as duas atividades de pesquisa propostas no final do capítulo, a obra apresenta, ao todo, vinte e seis questões. Dentre estas, dezessete são qualitativas e nove utilizam o formalismo matemático. Quanto à ênfase na apresentação dos exercícios, constatamos que prevalece a Ciência pura, compreendendo vinte e duas questões. Apenas quatro exercícios têm enfoque CTS. Ressaltamos que há questões que atendem, ao mesmo tempo, a duas perspectivas - como Ciência pura e HCF ou CTS; porém observamos o enfoque que apresenta o maior destaque.

Em nossa análise, os conteúdos da obra de Pietrocola et al. estão bem detalhados e são compatíveis com os parâmetros adotados para comparação da obra de Okuno e Yoshimura (2010). A apresentação dos conhecimentos científicos atende às orientações dos PCNs, com ênfase equilibrada entre a Ciência pura, a História e Filosofia da Ciência e a Ciência-Tecnologia-Sociedade. Os textos com enfoque HCF e CTS são contextualizados, diferenciados e interessantes, reunindo elementos motivadores para o debate entre os alunos. Os exercícios propostos apresentam características de nível adequado para o estudante do

Ensino Médio, possibilitando a aplicação em sala de aula. Quanto à ênfase nas atividades, prevalece a Ciência pura, embora as duas pesquisas propostas pelos autores na perspectiva CTS sejam bem abrangentes. Conquanto o enfoque HFC apareça com bastante destaque ao longo do capítulo, notamos a ausência de propostas de atividades ou de exercícios nessa perspectiva.

(8) *COMPREENDENDO A FÍSICA*

Volume 3, ano 2011, 416 p.

Autor: Alberto Gaspar

Editora: Ática

A obra didática *Compreendendo a Física*, de Alberto Gaspar, foi adotada por uma escola do Núcleo Regional de Educação de Maringá, correspondendo 1,6% entre as sessenta e três instituições de Ensino Médio. O terceiro volume está estruturado em quatorze capítulos. Os capítulos 12, 13 e 14 apresentam, respectivamente, os temas “Relatividade” (p. 298-321), “Origens da Física Quântica” (322-351) e “A nova Física” (352-393).

No capítulo dedicado à Física Quântica, o autor apresenta o tópico “Os raios X e a radioatividade” (p. 336), compreendendo duas páginas. Após abordar a história da descoberta dos raios X por Röntgen, Gaspar descreve a descoberta da radioatividade por Becquerel e as contribuições do casal Curie nos estudos de materiais radioativos. Explica as emissões alfa, beta e gama e ressalta a importância dos estudos das radiações para o conhecimento da natureza da matéria. Nota-se que o intuito do autor é somente dar uma ideia do que é a radioatividade, sem se aprofundar no conteúdo, com enfoque na História e Filosofia da Ciência. Na sequência, são apresentados os modelos atômicos de Thomson, Rutherford e Bohr.

O autor aborda o núcleo atômico e a energia nuclear (p. 364-368) no último capítulo - “A nova Física”. Explica as emissões alfa, beta e gama e os processos de transmutação, fusão e fissão nuclear. Ao mencionar o termo isótopo, apresenta uma nota de rodapé com a definição. A explicação do processo de reação em cadeia não está clara na obra. A utilização da energia nuclear na produção de energia elétrica é mencionada sucintamente. No final do capítulo, Gaspar insere textos para leitura e reflexão na seção “Conhecendo um pouco mais...”, com o objetivo de complementar o conteúdo básico, quando são apresentadas as

biografias de alguns cientistas, entre eles Marie e Pierre Curie, Antoine H. Becquerel, Ernest Rutherford e Niels Bohr. Acrescenta textos sobre as aplicações da radioatividade em exames de tomografia por emissão de pósitrons (PET) e por ressonância magnética nuclear, e os modelos de *camada*, da *gota líquida* e o *nuclear coletivo* para o núcleo do átomo.

Entre os exercícios propostos nos tópicos analisados, encontramos duas questões resolvidas como exemplos de aplicação dos conteúdos básicos e oito exercícios propostos para resolução. Na seção “Enem- Exame Nacional do Ensino Médio”, o autor propõe mais cinco questões de exames do Enem realizados entre 2000 e 2009. Assim, são treze exercícios propostos que envolvem os conteúdos tomados como parâmetro em nossa análise. Dentre estes, oito são aplicações do formalismo matemático e cinco são qualitativos. Com relação ao enfoque, onze exercícios apresentam ênfase na Ciência pura e dois na perspectiva CTS.

Nota-se que o intuito do autor é dar uma noção geral do fenômeno de radioatividade e da energia nuclear, sem aprofundamentos. Com relação às orientações dos PCNs, destaca-se a ênfase HFC na abordagem do tópico sobre a radioatividade, enquanto a Ciência pura prevalece na apresentação dos demais tópicos analisados e nos exercícios propostos. A perspectiva CTS aparece apenas nos dois textos recomendados para leitura.

(9) FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO

Volume 3, ano 2010, 288 p.

Autores: Kazuhito Yamamoto e Luiz Felipe Fuke.

Editora: Saraiva

A obra *Física para o Ensino Médio* não foi adotada por nenhuma escola do Núcleo Regional de Educação de Maringá. O volume 3 está estruturado em quatro unidades, distribuídas em dezenove capítulos. A Física Moderna é apresentada na unidade 4 (p. 234-280), com quarenta e sete páginas. Os capítulos 17, 18 e 19 abordam, respectivamente, a Teoria da Relatividade Especial (p. 234-244), a Teoria Quântica (p. 245-259) e a Física Nuclear (p. 260-280).

O modelo atômico didático é apresentado pelos autores no capítulo 1º, ao introduzirem os estudos de Eletrostática. Ao comentarem a descoberta das partículas subatômicas, citam que o elétron foi detectado experimentalmente por J. J. Thomson, em 1887, mas sabe-se que foi em 1897.

No tópico “A evolução dos modelos atômicos”, os autores relatam as primeiras ideias que surgiram na Antiguidade para explicar a estrutura da matéria e como emergiu a ideia de átomo. Comentam sobre os modelos atômicos de Dalton, Thomson, Rutherford e Bohr. O modelo atômico de Bohr é abordado mais detalhadamente no capítulo 18, dedicado à Teoria Quântica.

O capítulo 19 versa sobre a Física Nuclear. Yamamoto e Fuke iniciam com uma reflexão sobre as aplicações do conhecimento científico, mais especificamente, da radioatividade. Os autores retomam o conceito de átomo na seção “O átomo, até a década de 1950”, ressaltando a importância do entendimento da teoria atômica para a evolução da ciência. Na sequência, descrevem massa atômica, número atômico e isótopo. Destacam, em um quadro, a explicação da massa de repouso das partículas subatômicas. No tópico “Outras partículas”, os autores comentam a descoberta de várias partículas e apresentam uma tabela com algumas de suas características principais. Para explicar como partículas tão pequenas são detectadas, Yamamoto e Fuke descrevem a câmara de bolhas e citam o método usado a partir de 1970, que emprega os grandes aceleradores de partículas.

A seção “A radioatividade e os processos nucleares” traz comentários sobre os experimentos e observações de Becquerel, que deram início às investigações do fenômeno de radioatividade. Os autores relatam as contribuições do casal Curie e de Rutherford para a compreensão da natureza das radiações nucleares e apresentam o conceito de radioatividade. Afirmam que “em 1911, Rutherford usou uma amostra do recém-descoberto polônio para bombardear a folha fina de ouro; após um determinado tempo, parte da amostra de polônio se transformava em chumbo” (YAMAMOTO; FUKU, 2010, p. 263). Na sequência, ainda na página 263, relatam que Rutherford e Soddy desvendaram a natureza dessas radiações, afirmando que “... na verdade eram partículas do núcleo compostas de 2 prótons e 2 elétrons” [sic]. Observamos que o parágrafo está muito confuso, em virtude de alguns equívocos. A montagem experimental citada foi planejada por Rutherford e colaboradores para estudar a estrutura interna do átomo, o que os levou à descoberta do núcleo atômico e à elaboração do modelo atômico conhecido como planetário. Os experimentos que conduziram Rutherford à detecção da radiação alfa e da radiação beta foram realizados em 1899 (Cf. capítulo 3º), com uma montagem diferente daquela citada pelos autores, a saber: a radiação, emitida de um material radioativo, passava por um campo magnético muito intenso e era dividida em dois feixes com trajetórias distintas, as quais foram denominadas de emissões alfa e beta. Outro equívoco, ao comentarem que Rutherford e Soddy desvendaram a natureza das radiações, é

que, além de não explicarem a função do polônio no experimento, afirmam que o núcleo da amostra emitiu partículas compostas por dois prótons e dois elétrons, quando sabemos que a partícula alfa é composta por um núcleo de hélio – dois prótons e dois nêutrons. Após essas considerações, os autores explicam o que são as emissões alfa, beta e gama, contudo a abordagem não é muito clara e deixa dúvidas na compreensão dos conceitos. Embora o termo decaimento tenha sido mencionado, não é apresentada a descrição do conceito.

Na sequência, Yamamoto e Fuke apresentam os conceitos de fissão nuclear e reação em cadeia, citam a bomba atômica como exemplo de aplicação e explicam a fusão nuclear. No quadro “Perguntas sobre o núcleo e duas descobertas”, os autores relatam as contribuições de Cesar Lattes para a descoberta do *méson pi* e o conceito de força forte, proposto por Hideki Yukawa.

A seção “As partículas do modelo padrão” descreve algumas partículas elementares e mostra um quadro com os tipos de quarks e suas respectivas cargas elétricas. Apresenta uma imagem do local onde se encontra o acelerador de partículas, o LHC, explicando o objetivo do grande equipamento. O conceito de força nuclear é introduzido em seguida. Yamamoto e Fuke explicam os quatro tipos de interações que se manifestam na natureza – a interação gravitacional, a elétrica, a forte e a fraca -, e fazem comparações entre as ações dessas forças. Explicam o que é meia-vida radioativa e comentam sobre a importância de se conhecer a atividade de uma amostra radioativa para fins de uso na medicina, na agricultura e na indústria. Acrescentam uma reflexão a respeito do que fazer com os rejeitos radioativos, visto que os materiais são descartados quando a atividade dos radioisótopos não é mais suficiente para as aplicações requeridas, mas ainda continuam emitindo radiações.

Na seção “A física na história”, os autores relatam brevemente as contribuições de Marie Curie na pesquisa com materiais radioativos, como também de sua filha e seu genro nos trabalhos com a radioatividade artificial.

Os autores, ao explicarem o que é datação por isótopos, descrevem as técnicas desenvolvidas para a determinação da época em que ocorreu determinado evento. Citam o papel da Geologia e da Paleontologia nesses processos e descrevem o método desenvolvido para a datação com o carbono-14. Apresentam, em seguida, dois exercícios resolvidos e contextualizados. O primeiro envolve o acidente radioativo de Goiânia e a meia-vida do cézio-137; e o segundo aborda a datação de esqueletos de animais com o carbono-14.

A seção “Outras palavras” aborda as usinas nucleares brasileiras. Os autores tecem alguns comentários a respeito do programa nuclear brasileiro e da Central Nuclear Almirante

Álvaro Alberto, no Rio de Janeiro. Descrevem as varetas de combustível, o vaso de pressão e o vaso de contenção do reator nuclear tipo PWR das usinas de Angra dos Reis, apresentando imagens explicativas. Na sequência, apresentam o funcionamento básico do circuito de uma usina termonuclear. Os autores tecem comentários sobre a filosofia de segurança na operação dos reatores nucleares, que visa aos mais elevados padrões de qualidade e confiabilidade. Ressaltam os cuidados e responsabilidades com os sistemas de segurança nas fases de elaboração do projeto, construção da usina e preparação dos operadores, e descrevem sucintamente a diferença entre o funcionamento básico de um reator nuclear e da bomba atômica. Os autores finalizam a seção introduzindo duas questões: a primeira, para os alunos repensarem sobre a construção de grandes empreendimentos que envolvem questões ambientais, políticas e sociais; a segunda, com o intuito de fazer os alunos organizarem as ideias com relação ao funcionamento básico dos circuitos de uma usina termonuclear.

No tópico “Radiações ionizantes”, Yamamoto e Fuke, ao introduzirem o conceito de energia de ligação entre átomos e moléculas, explicam o que são as radiações ionizantes e sua interação com a matéria. Na sequência, comentam a aplicação da radiação em alimentos, que, na prática, tem a finalidade de impedir a proliferação de micro-organismos em alguns alimentos. Os autores inserem uma tabela que mostra as doses aceitáveis de irradiação para alguns alimentos. Em outra tabela, expõem alguns efeitos de irradiação aguda observados em pessoas adultas. Os autores completam a seção com explicações a respeito do contador Geiger e sugerem a leitura do livro “Energia nuclear: uma tecnologia feminina”, para quem deseja ir além dos conhecimentos apresentados na obra.

Yamamoto e Fuke encerram o capítulo dedicado à Física Nuclear com uma série de doze exercícios propostos. Dentre estes, sete privilegiam o formalismo matemático e cinco são qualitativos. Onze exercícios enfocam os conhecimentos científicos e apenas um apresenta, ao mesmo tempo, as perspectivas CTS e HFC. Quanto aos conteúdos escolares abordados pelos autores, observamos que estão de acordo com aqueles tomados como parâmetro da obra de Okuno e Yoshimura (2010). A apresentação dos conhecimentos científicos está afinada com as orientações dos PCNs, uma vez que a obra enfoca a evolução histórica das Ciências e as relações entre ciência, tecnologia e sociedade.

(10) *QUANTA FÍSICA*

Volume 3, 2010, 240 p.

Autores: Carlos Aparecido Kantor; Lilio Alonso Paoliello Junior; Luis Carlos de Menezes; Marcelo de Carvalho Bonetti; Osvaldo Canato Junior; Viviane Moraes Alves.

Editora: PD

O volume 3 da coleção *Quanta Física*, de Kantor et al., está dividido em duas unidades temáticas. A primeira aborda as “Radiações, materiais, átomos e núcleos” (p. 10-92), em quatro capítulos. A segunda unidade apresenta “Toda a Física, hoje e através da história” (p. 93 – 238), em sete capítulos. A obra não foi adotada por nenhuma escola do NRE de Maringá.

No capítulo 1º da Unidade 1, os autores abordam “As radiações e a matéria”. As seções “As radiações na medicina, na indústria, na guerra e na Ciência”, e apresentam as formas de radiações eletromagnéticas e algumas de suas aplicações no cotidiano. Os autores sugerem três atividades de pesquisa em “Faça parte 3: radiações na medicina”, envolvendo conhecimentos sobre equipamentos de diagnóstico ou de terapia. Na seção “As radiações e a matéria ao longo da história”, Kantor et al. relatam as primeiras ideias que surgiram na Antiguidade sobre a constituição da matéria. Citam os alquimistas e a busca do elixir da longa vida. Ao abordarem o átomo de Dalton, os autores relatam o contexto histórico-social do século XVIII que levou à elaboração da primeira teoria atômica. Na sequência descrevem, de forma contextualizada, como se revelou o modelo atômico de Thomson e as observações que levaram à descoberta dos raios X. No quadro “Conexão: a natureza granular da matéria”, os autores explicam os eventos que culminaram na confirmação de que a matéria é constituída de partículas denominadas átomos. No tópico “Com a radiatividade, o núcleo atômico entra para a história”, são introduzidas as primeiras noções de radiação nuclear. Citam a descoberta das emissões alfa, beta e gama na virada do século XIX para o século XX e explicam a natureza dessas radiações. Os autores relatam os experimentos realizados por Rutherford que culminaram na identificação do núcleo atômico e a continuidade das investigações que levaram à descoberta do próton, do nêutron e de outras partículas. No final do capítulo, Kantor et al. apresentam a seção “Dica”, sugerindo uma pesquisa sobre os trabalhos de alguns cientistas, com o intuito de se compreender melhor o rico contexto científico que marcou a passagem do século XIX para o século XX.

No capítulo 2º (p. 26-51) da Unidade 1 os autores, ao apresentarem a seção “O átomo quântico”, abordam o modelo atômico de Rutherford e de Bohr. O capítulo 3º (p. 52-75) versa

sobre “As radiações, o núcleo atômico e suas partículas”. Na seção “As radiações nucleares e a constituição do núcleo”, Kantor et al. comentam as radiações alfa, beta e gama, cuja natureza ainda permanecia desconhecida por alguns anos depois de serem descobertas. Relatam as contribuições de Becquerel, de Marie Curie e de Rutherford para a compreensão do fenômeno de radioatividade e ressaltam as dificuldades encontradas pelos cientistas na investigação dos constituintes do núcleo do átomo. Na sequência, introduzem o conceito de isótopo e de interações nucleares fortes e fracas. Apresentam um relato das contribuições de Enrico Fermi para o entendimento da natureza da radiação beta e da interação nuclear fraca. Retomam as emissões alfa, beta e gama, explicando que o quebra-cabeça da constituição nuclear e de sua radioatividade aos poucos foi resolvido. Os autores apresentam uma síntese da constituição dos núcleos e da radioatividade natural, para o aluno rever os conceitos abordados no capítulo. A seção “Faça parte – 1: famílias radiativas naturais” sugere quatro atividades, com a apresentação de um quadro das famílias radioativas e um diagrama das desintegrações do urânio-235. Os autores retomam os conceitos de isótopo, número atômico e de massa atômica no quadro “Veja Mais: equivalência entre massa e energia nas reações nucleares”, e explicam mais detalhadamente como acontecem as reações nucleares. Em “Sua parte – 2” são introduzidos quatro exercícios para aprofundamento dos conceitos trabalhados. Ainda na seção sobre as radiações e o núcleo atômico, os autores introduzem as tecnologias nucleares. O quadro “Veja mais: como determinar a idade de múmia ou de telas de linho” explica o que é meia-vida radioativa e a técnica de datação de objetos muito antigos com o carbono-14. O conteúdo é complementado com a seção “Sua parte - 3”, que propõe quatro exercícios para aprofundamento do conceito de meia-vida.

Na seção “Bombas e usinas nucleares”, Kantor et al. explicam o fenômeno de fissão nuclear. Relatam o contexto histórico e político da década que antecedeu a Segunda Guerra Mundial, os eventos que levaram à descoberta da fissão nuclear, a corrida nuclear que se sucedeu e a aplicação da reação em cadeia que resultou nas duas bombas atômicas que destruíram Hiroshima e Nagasaki, em 1945. Apresentam ainda uma síntese das ideias em que se baseia o uso militar e energético da fissão nuclear. No quadro “Conexão: ciência e tecnologia a serviço da guerra”, os autores comentam mais detalhadamente os experimentos de fissão, realizados pela primeira vez pelo químico alemão Otto Hahn e explicados pela física alemã Lisa Meitner, cujos resultados tornaram real a possibilidade de desenvolver armas nucleares. Tecem comentários sobre o Projeto Manhattan, que culminou no lançamento das duas bombas atômicas no Japão, sobre a “Guerra Fria”, que dividiu o mundo em duas

potências antagônicas – os Estados Unidos da América e a União Soviética - após a Segunda Guerra Mundial, sobre os conflitos armados que surgiram no Oriente e sobre o enorme arsenal de bombas de fissão e de fusão nucleares que ambas as potências acumularam em virtude da corrida armamentista. Os autores ressaltam que a Constituição brasileira proíbe o desenvolvimento ou o uso de armas nucleares, complementando com comentários sobre as preocupações quanto à utilização do plutônio, subproduto natural da geração elétrica nuclear, para fins bélicos. No tópico “Bombas nucleares de fissão e fusão”, os autores explicam as condições para que se forme uma reação em cadeia em uma bomba de fissão e em uma bomba de fusão, complementando com exercícios em “Sua parte – 4 e 5”. O tópico “Usinas nucleares” complementa a seção. Os autores comentam o acidente nuclear de Chernobyl, explicam as funções de reatores nucleares de alta potência e de baixa potência e descrevem o funcionamento básico de uma usina termonuclear. Em “Faça parte 2 - energia nuclear: riscos, benefícios e uso militar” são propostas quatro atividades para pesquisa relacionadas com reatores nucleares para geração de energia elétrica, os acidentes nucleares de Chernobyl e Three Mile Island e o uso de energia nuclear para fins bélicos. O capítulo 3º da Unidade 1 é finalizado com a seção “As partículas elementares e as forças fundamentais” em que os autores retomam, entre outros conceitos, os de interação nuclear forte e fraca.

O capítulo 6º (p. 215-232) da Unidade 2 é dedicado à “Energia, economia e meio ambiente”. Os autores, ao abordarem as “Alternativas energéticas, custos e riscos”, retomam a questão do uso da energia nuclear. No quadro “Conexão: a bomba de fissão nuclear” é apresentada uma breve comparação entre a reação em cadeia que ocorre em um reator nuclear e a que ocorre em uma bomba de fissão.

Observamos que Kantor et al. abordam a Física Moderna e Contemporânea ao longo de quase toda a obra, diferentemente das outras obras analisadas, que apresentam a FMC apenas nos últimos capítulos. A apresentação do contexto histórico-social em que ocorreram as ideias científicas é um diferencial na obra *Quanta Física*. Os textos, de leitura fluida e agradável, apresentam um encaminhamento que visa estimular o estudante a questionar, ao mesmo tempo em que proporciona a compreensão clara dos eventos que levaram ao desenvolvimento do pensamento científico. A apresentação dos conteúdos conceituais não obedece à sequência tradicional dos livros didáticos e, sim, à evolução histórica dos conceitos científicos. À medida que a abordagem dos temas avança, os autores retomam os conceitos trabalhados com novos enfoques, a fim de revisar e aprofundar os conhecimentos ou relacioná-los com outros conteúdos e outras disciplinas. Ao longo dos capítulos são inseridas

sugestões de atividades nas seções “Sua Parte”, “Faça parte” e “Dica”, visando ao aprofundamento dos conceitos abordados e de suas aplicações tecnológicas no cotidiano.

Ao compararmos os conteúdos escolares apresentados pelos autores de *Quanta Física* com aqueles tomados como parâmetro de Okuno e Yoshimura (2010), observamos que a obra aborda os conteúdos que consideramos fundamentais para a compreensão do fenômeno de radioatividade. Notamos que a apresentação dos conhecimentos científicos privilegia o enfoque HFC, contudo, a perspectiva CTS é destacada ao longo das seções e das atividades propostas. Nesse sentido, entendemos que a apresentação dos conhecimentos científicos está em harmonia com as orientações dos PCNs.

Quanto aos exercícios e atividades propostos, os autores sugerem doze atividades de pesquisa envolvendo conteúdos relativos à radioatividade. Dentre estas, seis apresentam ênfase em CTS, cinco em Ciência pura e uma em HFC. Todos os dezesseis exercícios propostos para aprofundamento dos conteúdos apresentam ênfase na Ciência pura, sendo doze formais e cinco qualitativos. Ao considerarmos todos os exercícios e atividades propostos, observamos que os autores enfocam preferencialmente a Ciência pura.

5.3.1. Resultados da análise dos livros didáticos

Definimos as categorias temáticas segundo a Análise de Conteúdo, de Bardin (1977), para classificar os conteúdos das obras didáticas. Estabelecemos as seguintes categorias: i) Obras didáticas que contemplam o tema “radioatividade”; ii) Enfoque CTS, HFC e Ciência pura que prevalece na apresentação do tema “radioatividade”; iii) Conteúdos conceituais abordados pelos autores das obras didáticas; iv) Ênfase na abordagem dos exercícios propostos (abordagem qualitativa, quantitativa; enfoque CTS, HFC, Ciência pura). Escolhemos a frequência, em porcentagem, como unidade de contagem.

A classificação dos conteúdos das obras didáticas é apresentada nos quadros 3 ao 6.

i) Obras didáticas que contemplam o tema radioatividade

Elaboramos o quadro 3 para expor as dez obras didáticas de Física do PNLD/2012, que apresentam o tema “radioatividade”. A classificação está organizada da seguinte forma:

- Primeira coluna: expõe as obras didáticas enumeradas, conforme a referência adotada no quadro 2;
- Segunda coluna: traz os autores das respectivas obras;
- Terceira coluna: indica as obras didáticas que contemplam o tema radioatividade.

OBRA DIDÁTICA	AUTORES	RADIOATIVIDADE
1. FÍSICA AULA POR AULA	Claudio Xavier; Benigno Barreto	x
2. FÍSICA E REALIDADE	Aurélio Gonçalves Filho; Carlos Toscano.	x
3. FÍSICA: CIÊNCIA E TECNOLOGIA	Carlos Magno A. Torres; Nicolau Gilberto Ferraro; Paulo Antonio de Toledo Soares.	x
4. CURSO DE FÍSICA	Antônio Máximo Ribeiro da Luz; Beatriz Alvarenga Álvares.	
5. FÍSICA	Gualter José Biscuola; Newton Villas Bôas; Ricardo Helou Doca.	
6. CONEXÕES COM A FÍSICA	Blaidi Sant'Anna; Gloria Martini; Hugo Carneiro Reis; Walter Spinelli.	
7. FÍSICA EM CONTEXTOS Pessoal - Social – Histórico	Maurício Pietrocola P. de Oliveira; Alexander Pogibin; Renata de Andrade Oliveira; Talita Raquel L. Romero.	x
8. COMPREENDENDO A FÍSICA	Alberto Gaspar	x
9. FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO	Kazuhito Yamamoto; Luiz Felipe Fuke	x

10. QUANTA FÍSICA	Carlos Aparecido Kantor; Lilio Alonso Paoliello Junior; Luis Carlos de Menezes; Marcelo de Carvalho Bonetti; Osvaldo Canato Junior; Viviane Moraes Alves.	x
--------------------------	--	---

Quadro 3: *Obras didáticas que contemplam o tema “radioatividade”.*

Embora os autores dos livros didáticos do PNLD/2012 abordem temas de Física Moderna e Contemporânea, constata-se que a radioatividade não é apresentada por todos eles. Dentre as dez obras, sete contemplam o tema, compreendendo 70% do total. Notamos ainda que os autores de sete das dez obras de Física do PNLD/2012 dedicam capítulos exclusivos à Teoria da Relatividade e à Física Quântica.

Em nossa análise observamos que *Física em Contextos: Pessoal - Social – Histórico*, de Pietrocola et al., e *Quanta Física*, de Kantor, Menezes et al., são as obras mais completas e detalhadas na apresentação dos conteúdos conceituais de radioatividade. Os autores dos dois livros didáticos abordam o tema de forma contextualizada, destacando os eventos que contribuíram para a descoberta e compreensão da radiação nuclear.

Excluímos, nos levantamentos seguintes, as obras 4, 5 e 6, uma vez que não contemplam o tema. Assim, a análise passa a se concentrar em sete obras do PNLD/2012, conforme mostram os quadros a seguir.

ii) *Enfoque CTS, Ciência Pura e HFC na apresentação dos conteúdos conceituais*

O quadro 4 expõe a categoria temática “Enfoque CTS (Ciência-Tecnologia-Sociedade), HFC (História e Filosofia da Ciência) e Ciência pura”, que prevalece na apresentação dos conteúdos conceituais de radioatividade nas obras didáticas. São apresentados os seguintes aspectos:

- Primeira coluna: refere-se aos enfoques CTS, Ciência pura e HFC;
- Segunda coluna: os itens assinalados referem-se ao enfoque que prevalece em cada obra que contempla a radioatividade;
- Terceira coluna: expõe a frequência com que os enfoques aparecem nas obras.

ENFOQUE	OBRA DIDÁTICA							FREQUÊNCIA (%)
	FÍSICA AULA POR AULA	FÍSICA E REALIDADE	FÍSICA: CIÊNCIA E TECNOLOGIA	FÍSICA EM CONTEXTOS: Pessoal-Social-Histórico	COMPREENDEDO A FÍSICA	FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO	QUANTA FÍSICA	
CTS	x	x	x	x		x	x	85,7
CIÊNCIA PURA			x	x	x	x	x	71,4
HFC				x	x	x	x	57,1

Quadro 4: Enfoque CTS, Ciência Pura e HFC na apresentação dos conteúdos conceituais.

Nota-se que prevalece a ênfase CTS na abordagem dos conteúdos conceituais, correspondendo a 85,7% dos livros didáticos que contemplam a radioatividade. A abordagem na perspectiva Ciência pura aparece em 71,4% e, na HFC, em 57,1% das sete obras. Os autores de *Física Aula por Aula* e *Física e Realidade* privilegiam o enfoque CTS, enquanto os de *Física: Ciência e Tecnologia* e *Compreendendo a Física* tratam dos enfoques CTS e Ciência pura, e HFC e Ciência pura, respectivamente. Os autores de *Física em Contextos: Pessoal-Social-Histórico*, *Física para o Ensino Médio* e *Quanta Física* apresentam um equilíbrio entre as ênfases CTS, HFC e Ciência pura.

iii) Conteúdos conceituais abordados pelos autores das obras didáticas

Elaboramos o quadro 5 para apresentar a categoria temática “Conteúdos conceituais abordados pelos autores das obras didáticas”. O quadro está organizado da forma descrita a seguir.

- Primeira coluna: corresponde aos conteúdos conceituais selecionados para análise, com base na obra de referência de Okuno e Yoshimura (2010);

- Segunda coluna: representa as obras didáticas de Física do PNLD/2012 que contemplam o tema “radioatividade”; os itens assinalados correspondem aos conteúdos identificados nos livros analisados;
- Terceira coluna: refere-se à frequência, em percentagem, com que os conteúdos aparecem nas obras didáticas.

CONTEÚDOS CONCEITUAIS	OBRA DIDÁTICA							FREQUÊNCIA (%)
	FÍSICA AULA POR AULA	FÍSICA E REALIDADE	FÍSICA: CIÊNCIA E TECNOLOGIA	FÍSICA EM CONTEXTOS: Pessoal-Social-Histórico	COMPREENDENDO A FÍSICA	FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO	QUANTA FÍSICA	
O modelo atômico didático	x	x	x	x	x	x	x	100,0
O núcleo atômico	x	x	x	x	x	x	x	100,0
Isótopos			x	x	x	x	x	71,4
Radioatividade: Emissões alfa, beta, gama	x		x	x	x	x	x	85,7
Decaimento radioativo	x	x	x	x	x		x	85,7
Meia-vida radioativa		x	x	x		x	x	71,4
Fissão nuclear	x	x	x	x	x	x	x	100,0
Reação em cadeia	x	x		x		x	x	71,4
Energia nuclear: o reator de fissão	x			x		x	x	57,1

Energia nuclear: a bomba atômica	x	x		x		x	x	71,4
---	---	---	--	---	--	---	---	------

Quadro 5: Conteúdos conceituais abordados pelos autores das obras didáticas.

Entre os conteúdos conceituais considerados fundamentais para o ensino-aprendizagem da radioatividade no Nível Médio, o levantamento mostra que o modelo atômico didático, núcleo atômico e fissão nuclear são abordados por todos os autores das obras didáticas. Os conceitos de emissões alfa, beta e gama e de decaimento radioativo estão presentes em 85,7%, enquanto as explicações de isótopo, meia-vida radioativa, reação em cadeia e energia nuclear para fins bélicos aparecem em 71,4% das obras. A energia nuclear para geração de energia elétrica através de reatores de fissão é apresentada por 57,1% dos livros didáticos.

Observamos ainda que, dentre as sete obras que contemplam o tema radioatividade, duas - *Física em Contextos: Pessoal-Social-Histórico* e *Quanta Física* - abordam todos os conteúdos considerados fundamentais para a compreensão dos conceitos. Os autores de *Física para o Ensino Médio*, embora tenham mencionado o decaimento radioativo, não deixaram clara a abordagem, por isso consideramos que o conceito não foi apresentado na obra. As demais obras apresentam lacunas na abordagem dos conteúdos, o que dificulta, em nossa análise, o ensino e a aprendizagem da radioatividade.

iv) *Ênfase na abordagem dos exercícios e atividades propostos (abordagem qualitativa ou formal e enfoque CTS, HFC e/ou Ciência pura)*

Elaboramos o quadro 6 para expor o enfoque dado pelos autores às atividades e exercícios propostos. Ressaltamos que entre os exercícios analisados nas obras didáticas há aqueles que atendem ao mesmo tempo a duas perspectivas - como ciência e HCF e como CTS, porém, observamos o enfoque que apresenta o maior destaque. O quadro 6 mostra os aspectos descritos a seguir.

- Primeira coluna - corresponde aos exercícios propostos nas obras, contemplando os seguintes aspectos: número de exercícios propostos, frequência da abordagem

qualitativa, frequência da abordagem formal, frequência do enfoque CTS, frequência do enfoque HFC, frequência do enfoque Ciência pura;

- Segunda coluna: corresponde às obras que contemplam o tema radioatividade.

EXERCÍCIOS E ATIVIDADES PROPOSTOS	OBRA DIDÁTICA						
	FÍSICA AULA POR AULA	FÍSICA E REALIDADE	FÍSICA: CIÊNCIA E TECNOLOGIA	FÍSICA EM CONTEXTOS: Pessoal - Social - Histórico	COMPREENDEDO A FÍSICA	FÍSICA PARA O ENSINO MÉDIO	QUANTA FÍSICA
Nº DE EXERCÍCIOS E ATIVIDADES PROPOSTOS	24	10	20	26	13	14	29
ABORDAGEM QUALITATIVA (%)	79,2	60,0	35,0	65,4	38,5	50,0	58,6
ABORDAGEM FORMAL (%)	20,8	40,0	65,0	34,6	61,5	50,0	41,4
ENFOQUE CTS (%)	41,7	10,0	10,0	15,4	15,4	14,3	20,7
ENFOQUE HFC (%)	8,3	0,0	5,0	0,0	0,0	7,1	3,4
ENFOQUE CIÊNCIA PURA (%)	50,0	90,0	85,0	84,6	84,6	78,6	75,9

Quadro 6: Ênfase na abordagem dos exercícios propostos.

Nas atividades e exercícios propostos pelos autores, nota-se que em quatro das sete obras prevalece a abordagem qualitativa sobre o formalismo matemático. A obra *Física para o Ensino Médio* apresenta um equilíbrio exato entre as duas abordagens. Quanto ao enfoque, destaca-se a Ciência pura em todas as obras. A ênfase na HFC está ausente em três livros didáticos e aparece muito pouco nos demais.

5.4. A PESQUISA COM OS PROFESSORES DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

A revisão bibliográfica que apresentamos no capítulo 1º revelou que os professores de Física do Ensino Médio têm dificuldades em ensinar a Física Moderna e Contemporânea em sala de aula. Para obter informações sobre o que eles pensam e vivenciam com relação à abordagem da FMC e, mais especificamente, à abordagem da radioatividade, realizamos uma sondagem entre dez professores de Física do Ensino Médio da rede pública de ensino do Paraná.

Do grupo entrevistado, oito professores integravam o Programa de Desenvolvimento Educacional (PDE), ano 2012, da Secretaria de Estado da Educação do Paraná (SEED), em parceria com a Universidade Estadual de Maringá (UEM). O PDE²² é uma política de formação continuada no Paraná regulamentada por lei que visa à valorização dos professores do Ensino Básico atuantes na rede pública estadual. Os professores que participam do PDE fazem parte do quadro próprio do Magistério (QPM), nível II – classe de 8 a 11. A aprovação ocorre mediante seleção pública, de acordo com as normas estabelecidas pela SEED. O docente que ingressa no Programa tem garantido o direito de afastamento remunerado de 100% de sua carga horária efetiva no primeiro ano e 25% no segundo ano. O PDE oferece cursos de formação continuada nas disciplinas específicas, com atividades nas modalidades presencial e a distância, em parceria com universidades públicas do Paraná. Sob a orientação de um professor de uma instituição de Ensino Superior, o professor desenvolve um plano de trabalho que contempla o Projeto de Intervenção Pedagógica na Escola, a Produção Didático-Pedagógica direcionada para a implementação do projeto e um artigo científico de conclusão do Programa. Finalizado o Programa, o professor é promovido para o nível III, com possibilidade de continuar avançando na carreira da classe 1 até a 11.

Os outros dois professores entrevistados (um deles já havia participado do PDE em 2007) fazem parte do Grupo de Trabalho em Formação Inicial e Continuada em Física (GTFIC), coordenado voluntariamente pelos professores Ricardo Francisco Pereira e Polônia Altoé Fusinato, da Universidade Estadual de Maringá. O grupo se reúne de duas a três vezes por mês desde 2006, em um dia da semana considerado como hora-atividade, estabelecido a cada ano pela Secretaria de Educação do Estado do Paraná. O PDE tem como finalidade que professores de Ensino Médio se dediquem a estudos e aprimoramento em suas respectivas

²² Outras informações sobre o PDE estão disponíveis em:
<http://www.gestaoescolar.diaadia.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=20>.

áreas de conhecimento. O estabelecimento desta prerrogativa pelos respectivos órgãos educacionais do Estado do Paraná foi interpretado como intenção de socializar o conhecimento, planejar e desenvolver atividades, produzir materiais para aulas experimentais e elaborar textos e unidades didáticas.

Os dez professores que participaram do estudo em Física pertencem a seis Núcleos Regionais de Educação (NRE) diferentes, a saber: Maringá (quatro professores), Umuarama (dois professores), Paranavaí (um professor), Campo Mourão (um professor), Toledo (um professor) e Goioerê (um professor). Dois docentes têm licenciatura em Física, três são licenciados em Matemática com habilitação em Física e cinco professores têm licenciatura em Ciências com complementação e habilitação em Física. Todos são concursados na disciplina de Física, com cargos efetivos, e todos têm pós-graduação: seis possuem dois cursos de especialização, dois professores têm um curso de especialização, um fez especialização e mestrado em Física “dura” e um professor possui especialização e estava cursando mestrado em Educação para a Ciência e a Matemática. Entre os entrevistados, quatro lecionavam Física no Ensino Médio por tempo entre oito e catorze anos e seis, entre dezesseis e vinte e cinco anos.

A pesquisa com os professores foi realizada por meio de um questionário (APÊNDICE B). Conforme já mencionamos, elaboramos os itens com base nos estudos que apontam os principais obstáculos à efetiva inserção de tópicos de FMC em sala de aula e nas orientações de Moreira (2010). Fizemos inicialmente um pré-teste do questionário, antes de sua utilização definitiva, aplicando-o a dois professores licenciados em Física que atuam na rede pública de ensino. O pré-teste permitiu que reformulássemos os itens, eliminando, acrescentando e adequando as perguntas e, ainda, que melhorássemos a redação.

Assim que elaboramos o questionário definitivo, aplicamo-lo ao grupo. Os docentes participaram espontaneamente do estudo, mostraram interesse e cordialidade e ficaram à vontade para responder às perguntas. Os professores do PDE responderam ao questionário durante um encontro promovido pelos coordenadores de Física do Projeto, na Universidade Estadual de Maringá. Os dois professores do GTFIC receberam o questionário em mãos e o devolveram assim que responderam às perguntas.

As respostas foram submetidas à Análise de Conteúdo, de Bardin (1977), classificadas em categorias temáticas, para que pudéssemos propor inferências e interpretações, conforme apresentamos a seguir.

5.4.1. Resultados da análise do questionário

Para apresentar a análise das respostas dadas pelos professores entrevistados a cada pergunta do questionário, utilizamos quadros (quando pertinentes) que mostram as categorias temáticas e, como regra de enumeração, a frequência em percentagem ou em número de aparição.

O quadro 7 refere-se às respostas das perguntas de números 1 e 2. Apresenta a formação acadêmica dos sujeitos da pesquisa, o tempo de docência na disciplina de Física e as modalidades e séries em que atuam no Ensino Médio (EM). Embora todos sejam concursados na disciplina de Física, o levantamento revela que apenas 20% dos professores entrevistados são licenciados em Física.

PROFESSOR	GRADUAÇÃO	PÓS-GRADUAÇÃO	TEMPO QUE LECIONA FÍSICA NO EM (anos)	MODALIDADE(S) E SÉRIES EM QUE ATUA NO EM
P ₁	•Licenciatura em Física	•Especialização em Educação de Jovens e Adultos: Tecnologias na Educação. •Mestrado em Física do Estado Sólido.	8	Ensino Regular 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
P ₂	•Licenciatura em Física	•Especialização em Didática e Metodologia de Ensino. •Mestrado em Educação para a Ciência e a Matemática (em andamento).	18	Ensino Regular 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
P ₃	•Licenciatura em Matemática e Ciências (habilitação em Física e Desenho Geométrico)	•Especialização em Ensino de Física e Matemática. •Especialização em Ética e Cidadania.	14	Ensino Regular 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a

P ₄	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Matemática (habilitação em Física e Desenho Geométrico) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Didática e Metodologia de Ensino. •Especialização em Modelagem Matemática. 	20	<p>Ensino Regular 1^a, 2^a, 3^a</p> <p>Educação de Jovens e Adultos (EJA) 1^a, 2^a, 3^a</p>
P ₅	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Matemática (habilitação em Física e Desenho Geométrico) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Metodologia no Ensino de Matemática. •Especialização em Educação Especial. 	9	Educação de Jovens e Adultos (EJA) 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
P ₆	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Ciências (complementação e habilitação em Física) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Educação Matemática. •Especialização em Prática Docente, Trabalho e Cidadania. 	16	<p>Ensino Regular 1^a, 2^a, 3^a</p> <p>Ensino Profissionalizante</p>
P ₇	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Ciências (complementação e habilitação em Física) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Ciências da Natureza e Interdisciplinaridade. 	25	<p>Ensino Regular 1^a, 2^a, 3^a</p> <p>Ensino Profissionalizante</p>
P ₈	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Ciências (complementação e habilitação em Física e Matemática) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Metodologia de Ensino. •Especialização em Orientação, Supervisão e Gestão Escolar. 	18	<p>Ensino Regular 1^a, 2^a, 3^a</p> <p>Ensino Profissionalizante</p>
P ₉	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Ciências (complementação e habilitação em Física e Matemática) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Ensino de Matemática 	18	Ensino Regular 1 ^a , 2 ^a , 3 ^a
P ₁₀	<ul style="list-style-type: none"> •Licenciatura em Ciências (complementação e habilitação em Física) 	<ul style="list-style-type: none"> •Especialização em Ensino de Matemática 	13	<p>Ensino Regular 1^a, 2^a, 3^a</p> <p>Magistério 3^a e 4^a séries</p>

Quadro 7: Formação acadêmica dos sujeitos da pesquisa, o tempo de docência na disciplina de Física e as modalidades e séries em que atuam no Ensino Médio (EM).

A pergunta de número 3 procurou investigar se o professor concorda ou não que é importante inserir a FMC no Ensino Médio. Verificamos que nove dos dez docentes concordaram que sim, é muito relevante. Um professor considerou que é importante, mas não é essencial, o que nos levou a inferir que o entrevistado julga que o conteúdo pode ser deixado de lado, em favor de outro que considere imprescindível.

Analisamos se os professores já haviam participado de cursos presenciais de formação continuada que abordassem tópicos de Física Moderna e Contemporânea. O levantamento das respostas à pergunta de número 4 mostrou que apenas três professores haviam feito algum curso nessa área²³. Vale observar que a maioria dos docentes entrevistados atua em sala de aula há bastante tempo, conforme mostra o quadro 6, e durante o período em que lecionam, somente 30% tiveram oportunidade de participar de tais cursos.

A pergunta de número 5 visou verificar se os professores têm dificuldades em ensinar tópicos de FMC no Ensino Médio. Caso o entrevistado considerasse que elas existem, deveria enumerar somente as alternativas pertinentes, em ordem da maior para a menor dificuldade. Os resultados são demonstrados nos quadros 8 e 9.

O quadro 8 apresenta, na primeira coluna, a categoria temática *dificuldades para o ensino da FMC no Ensino Médio* e, na segunda coluna, a *frequência (%)* com que cada item foi apontado pelo grupo entrevistado.

DIFICULDADES PARA O ENSINO DA FMC NO EM	FREQUÊNCIA DAS RESPOSTAS (%)
a. Carga horária semanal insuficiente para a introdução dos conteúdos de FMC	90
b. Carência de cursos de formação continuada na área de FMC	90
c. O professor tem pouco tempo disponível para pesquisa e preparação de aulas de FMC.	90
d. Adequar os conteúdos de FMC para o EM	90
e. Conteúdos de FMC foram abordados superficialmente durante a graduação	60
f. Resistência do professor em reorientar sua prática pedagógica	50
g. Pouca disponibilidade de recursos didático-pedagógicos	50

²³ Os professores do PDE-2012, posteriormente à aplicação do questionário, participaram de dois cursos de formação continuada com enfoque na Física Moderna e Contemporânea.

h. A FMC é incompreensível, difícil e abstrata para os estudantes do EM	50
i. Alunos do EM apresentam defasagem de conteúdos de Matemática básica para compreenderem o formalismo matemático de FMC	50
j. Falta de entusiasmo do professor	50
k. Formação inicial pautada no formalismo matemático com relação à FMC.	40 (66,7% entre aqueles que assinalaram o item e)
l. Conteúdos de FMC não foram abordados durante a graduação	30
m. Outra(s)	0

Quadro 8: Levantamento das principais dificuldades apontadas pelos professores para o ensino/aprendizagem de FMC no Nível Médio e a percentagem das respostas.

A classificação da maior para a menor dificuldade é apresentada no quadro 9. Expomos somente os três itens mais indicados pelos professores dentre os doze que constam na pergunta de número 5, pois as respostas aos demais itens foram muito diversificadas.

CLASSIFICAÇÃO DA MAIOR PARA A MENOR DIFICULDADE PARA O ENSINO DA FMC NO EM	FREQUÊNCIA (%) DAS RESPOSTAS
1ª maior dificuldade Carga horária semanal insuficiente para a introdução dos conteúdos	70
2ª maior dificuldade Carência de cursos de formação continuada na área de FMC	40
3ª maior dificuldade O professor tem pouco tempo disponível para pesquisa e preparação de aulas de FMC.	40

Quadro 9: Classificação da maior para a menor dificuldade para o ensino da FMC no Ensino Médio (EM) e a frequência com que cada item foi apontado pelos professores entrevistados.

A carga horária de apenas duas aulas semanais de Física, em cada série, foi apontada por 90% dos professores como um dos obstáculos ao ensino de tópicos de FMC no Nível Médio. Ao analisarmos a classificação das respostas da maior para a menor dificuldade, apresentada no quadro 9, constatamos que 70% dos entrevistados consideraram a insuficiência da carga horária como o maior entrave para o ensino-aprendizagem dos conteúdos. Um professor alegou que, apesar de ser um obstáculo, não é impedimento para a abordagem do tema. Nas duas últimas décadas a área das Ciências – Física, Química e Biologia - sofreu uma redução significativa de carga horária na grade curricular. Ao mesmo tempo, a implementação do currículo escolar proposto pelas Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM) implica um processo de ruptura e transição, em que os profissionais da Educação devem rever sua prática sobre *o quê* e *como* ensinar; contudo, entendemos que os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) para o Ensino Médio, produzidos para difundir as Diretrizes e orientar os professores na busca de novas abordagens e metodologias, não forneceram subsídios suficientes para que os profissionais da Educação definissem *o quê* ensinar, ainda mais com uma carga horária reduzida. Dessa forma, todos os anos os professores de Física das escolas públicas começam o ano letivo angustiados, pois terão que decidir que conteúdos selecionar e se darão conta de desenvolver o plano de trabalho docente.

O quadro 8 mostra que 90% dos sujeitos da pesquisa consideraram a carência de cursos de formação continuada na área de FMC um obstáculo relevante para o ensino dos conteúdos no Nível Médio. Na opinião de 40% dos entrevistados, esse item figura como o segundo maior obstáculo (quadro 9) para a abordagem do tema em sala de aula. Embora três professores tenham participado de estudos na área de FMC, conforme respostas da pergunta de número quatro, 90% dos entrevistados consideraram que há carência de cursos de capacitação e atualização com enfoque na Física desenvolvida a partir do século XX.

A dificuldade em adequar os conteúdos científicos de FMC para o Ensino Médio, apresentada no quadro 8, foi apontada por nove dos dez professores entrevistados. A classificação pela ordem da maior para a menor dificuldade variou entre a segunda e nona posições. Em nossa interpretação, essa dificuldade é explicada pela ineficácia na formação inicial desses docentes, uma vez que 60% afirmaram que conteúdos de FMC foram abordados superficialmente durante a sua graduação. Dentre estes, 66,7% (quatro entre os seis professores) responderam ainda que a formação inicial foi pautada pelo formalismo matemático. Essas observações nos levam a inferir que a abordagem superficial,

matematizada e descontextualizada da FMC refletiu-se na atuação desses professores em sala de aula, de tal forma que se tornou um obstáculo à efetiva inserção de conteúdos no Ensino Médio. Outros 30% dos entrevistados responderam que a FMC não foi abordada em nenhum momento durante toda a graduação. Entendemos que as lacunas deixadas na formação do professor dificultam a abordagem do tema em sala de aula, uma vez que o docente não tem ideia sobre o *porquê de ensinar*, o *quê ensinar* e o *modo de fazê-lo*. Observamos que apenas um professor dentre os dez entrevistados estudou tópicos de FMC durante a graduação. Estes resultados nos levam a inferir que a formação inicial de 90% dos sujeitos da pesquisa não lhes forneceu subsídios suficientes, ou nenhum subsídio em alguns casos, para que pudessem realizar a transposição didática dos conteúdos científicos para conteúdos escolares e ensiná-los efetivamente no Nível Médio.

Para suprir as deficiências em sua formação inicial o docente teria que dedicar um tempo considerável ao estudo dos conteúdos e ao planejamento de estratégias e metodologias. Não obstante, observamos que 90% dos professores consideraram que a insuficiência do tempo disponível para pesquisa e preparação de aulas é um dos entraves para a abordagem da FMC. Verificamos ainda que 40% dos entrevistados afirmaram que este é o terceiro maior obstáculo para o ensino do tema no Nível Médio. Esse resultado é compreensível, visto que os professores cumprem uma extensa carga horária semanal de 40 horas-aula²⁴ (32 horas-aula em sala de aula e oito de hora-atividade, ano de 2012). Consequentemente, a abordagem dos conteúdos torna-se ocasional, ou até inexistente.

A resistência do professor em reorientar sua prática pedagógica foi apontada por 50% dos sujeitos da pesquisa; contudo o item ficou posicionado entre a sétima e nona posições na ordem de classificação da maior para a menor dificuldade. Entendemos que esse problema seja decorrente da deficiência na formação inicial do docente, a qual, além de deixar lacunas na aprendizagem dos conteúdos, não contribuiu para que o professor construísse uma visão epistemológica e contextualizada da Física.

Outro entrave para o ensino-aprendizagem da FMC no Ensino médio, na opinião de 50% dos entrevistados, foi a escassez de recursos didático-pedagógicos. Entendemos que fontes de pesquisa como a biblioteca do professor na escola, livros paradidáticos e do Ensino Superior, periódicos na área de ensino de Ciências (inclusive *online*), revistas científicas,

²⁴ O padrão de concurso de professor estatutário do Paraná, para uma disciplina, é de 20 horas-aula semanais. Em 2012 o professor cumpria 16 horas-aula em sala e 4 horas-aula de hora-atividade, para cada padrão de concurso. No segundo semestre de 2013 passou a valer 1/3 da carga horária total para a hora-atividade: o professor passou a ministrar, para cada padrão de 20 horas-aula, 14 aulas em sala e 6 horas-aula de hora-atividade.

artigos postados na *internet*, *sites* de Universidades e sociedades científicas, vídeos e imagens, são recursos alcançáveis para todos os profissionais da educação. A resposta dos entrevistados nos leva a deduzir que os estudos realizados por pesquisadores da área de Ensino em Ciências ainda estão distantes da escola básica. Falta autonomia a esses professores com relação às metodologias e estratégias para o ensino dos conteúdos, ou seja, faltam orientações do *como fazer*. Entendemos que a deficiência na formação inicial contribuiu para a instalação desse cenário, em que o professor se sente despreparado para planejar as estratégias de ensino, em virtude do desconhecimento de referências teóricas para a abordagem de conteúdos de FMC.

No grupo entrevistado, 50% responderam que os alunos apresentam defasagem de conteúdos de Matemática básica para compreenderem o formalismo matemático de FMC. Notamos, nessas respostas, que esses docentes têm uma visão matematizada dos conteúdos a ensinar, revelando traços de uma formação inicial pautada pelo formalismo matemático. Ao mesmo tempo, os professores afirmaram que a FMC é incompreensível, difícil e abstrata para os estudantes do Ensino Médio, ou seja, os educandos teriam dificuldades cognitivas em compreender os conteúdos. As respostas nos levam a interpretar que a visão matematizada dos docentes, com relação ao ensino de FMC, levou-os a pensar que os estudantes do Ensino Médio não têm condições de aprender os conteúdos, em virtude da defasagem em Matemática básica.

A falta de entusiasmo foi apontada por 50% dos entrevistados; contudo, o item foi classificado entre a décima e décima segunda posições, na ordem da maior para a menor dificuldade. Embora a desmotivação do professor se configure como um entrave para a abordagem de tópicos de FMC, não foi considerada tão relevante pelos sujeitos da pesquisa.

A pergunta de número 6 investigava se o professor já havia abordado o tópico *radioatividade* em sala de aula. Oito professores responderam que sim, já haviam abordado ocasionalmente alguns conceitos e aplicações; um professor alegou que não, porque há obstáculos para a abordagem do tema, e um professor afirmou que nunca havia pensado a respeito. Esses resultados evidenciam que o tópico não foi ensinado efetivamente pelos docentes entrevistados.

Dentre os recursos didático-pedagógicos apresentados na pergunta de número 7, solicitamos aos professores que assinalassem aqueles que julgavam fundamentais para pesquisa, estudo e preparação de aulas de temas de FMC, em particular a radioatividade. O quadro 10 expõe os resultados.

RECURSOS DIDÁTICO-PEDAGÓGICOS PARA PESQUISA E PREPARAÇÃO DE AULAS DE FMC	FREQUÊNCIA DAS RESPOSTAS (%)
Revistas científicas	70
Laboratório de informática e <i>internet</i>	60
Documentários	60
Vídeos e imagens	50
Filmes de ficção científica que apresentem corretamente aplicações de FMC	50
Periódicos na área de ensino de Física	50
Livros paradidáticos de Física	50
Livro didático de Física para o Ensino Médio	40
Livros de Física do Ensino Superior	30
Laboratório de Física	20
Jornais	10
Outro(s)	0

Quadro 10: Recursos didático-pedagógicos que os professores julgam fundamentais para pesquisa, estudo e preparação de aulas de temas de FMC.

As revistas científicas foram apontadas como recursos fundamentais por 70% dos sujeitos da pesquisa; porém consideramos este item como o menos acessível ao professor da escola média, pois acreditamos que a assinatura de uma revista científica conceituada, que é relativamente cara, raramente é disponibilizada aos professores das escolas públicas.

O laboratório de informática e a *internet* foram apontados por 60% dos professores. Esperávamos uma frequência maior das respostas relativas a este item, uma vez que são recursos acessíveis nas escolas do Paraná. Além do mais, a informática educativa, sobretudo a *internet*, está cada vez mais presente nas discussões que envolvem o ensino de Física, em particular a Física Moderna e Contemporânea. A *internet* proporciona ao pesquisador uma série de pesquisas, imagens, vídeos e documentários completos que abordam a radioatividade, além de *sites* de universidades, de sociedades científicas e de livrarias que apresentam os últimos lançamentos de livros.

Vídeos e imagens foram avaliados como recursos didático–pedagógicos fundamentais por 50% dos entrevistados. Para o ensino de radioatividade, consideramos essas ferramentas extremamente importantes, uma vez que facilitam a compreensão dos conceitos físicos envolvidos, além de enriquecerem a abordagem da História e Filosofia das Ciências e da relação entre Ciência, Tecnologia e Sociedade. Não obstante, 50% dos professores entenderam que o uso de tais recursos é dispensável para estudo, pesquisa e preparação de aulas.

Filmes de ficção científica que apresentem corretamente aplicações de FMC foram apontados por 50% do grupo. Entendemos que esse recurso é mais trabalhoso para o professor, uma vez que seria necessário fazer recortes do filme, para depois discutir os conceitos e teorias junto com os estudantes.

Apenas 50% dos professores consideraram que os periódicos de ensino de Física são recursos fundamentais para pesquisa, estudo e preparação de aulas. Podemos encontrar revistas *online* de fácil acesso, com artigos direcionados aos professores do Ensino Médio que apresentam as últimas pesquisas na área. Em nossa interpretação, metade dos entrevistados desconhece a relevância dos periódicos em ensino de Física para a sua prática diária.

Os livros paradidáticos foram apontados por 50% dos professores, enquanto os livros didáticos foram indicados por 40% deles. Entendemos que os livros paradidáticos são um instrumento necessário para o professor, pois contribuem para o aprofundamento e compreensão dos conteúdos a ensinar. De acordo com a análise dos livros didáticos de Física apresentada no item, vimos que a radioatividade não é abordada por todos os autores do PNLD/2012, e, entre aqueles que apresentam o tema, os conteúdos básicos são abordados de forma parcial, com exceção de duas obras. É interessante notar que o manual escolar ainda é visto por uma boa parcela de professores como um recurso fundamental para o desenvolvimento de sua prática em sala de aula.

Os livros de Física do Ensino Superior foram considerados relevantes por 30% dos entrevistados. Embora as bibliotecas do professor, nas escolas do Paraná, disponibilizem algumas obras importantes, as respostas dos entrevistados nos levam a inferir que há pouco interesse do professor do Ensino Médio em usar tais recursos.

Apenas 20% dos professores apontaram que o laboratório de Física é fundamental para o ensino-aprendizagem da radioatividade no Nível Médio. É compreensível esse resultado, uma vez que consideramos que as condições não são adequadas para o trabalho experimental na área de radioatividade.

Por fim, os jornais foram apontados apenas por um professor, dentre os dez entrevistados. Consideramos que os jornais não se configuram como um recurso confiável para pesquisa e estudo, mas acreditamos que o professor pode fazer uso de informações com o intuito de problematizar as aulas e, a partir daí, motivar os estudantes para o estudo de Ciências. Algumas notícias de caráter científico são veiculadas nos meios de comunicação com muita ênfase e os alunos costumam perguntar a respeito durante as aulas. Foi o caso da notícia sobre o *bóson de Higgs*, em julho de 2012, detectado pelo grande acelerador de partículas conhecido como LHC, do laboratório CERN. O professor deve estar atento e a par das informações, sobretudo para explicar os fundamentos físicos que embasam a notícia.

A pergunta de número 8 solicitou aos entrevistados que considerassem a possibilidade de abordar o tópico *radioatividade* em sala de aula. Neste caso, o professor deveria opinar pela forma de abordagem que deveria prevalecer para o ensino do tema no Nível Médio. Os resultados da análise mostraram que 60% dos professores opinaram pela abordagem qualitativa dos conteúdos, no sentido de explorar os conceitos físicos e deixar de lado o formalismo matemático. Dentre os demais docentes, 20% responderam que deveria prevalecer a abordagem qualitativa acrescida de breve formalismo matemático, e 20% opinaram pela abordagem equilibrada entre a qualitativa e o formalismo matemático. Para a presente pesquisa essas respostas eram muito importantes, pois nos orientaram no direcionamento das atividades da sequência didática, de forma a privilegiar o enfoque qualitativo dos conteúdos.

A pergunta seguinte, de número 9, tinha relação com a anterior, uma vez que visou verificar qual o número de aulas que o professor julgava adequado para abordar o tópico *radioatividade* e avaliar os alunos, levando-se em consideração a carga horária semanal de Física. As respostas variaram entre quatro e doze aulas e um professor respondeu que não tinha ideia. Como não houve convergência da maioria para um número específico, decidimos elaborar a sequência didática para oito aulas. A pergunta de número 9 também solicitava aos professores que opinassem sobre a série em que o tópico deveria ser abordado. Dentre as respostas, 50% indicaram a 3ª série, 20% indicaram a 2ª série, 20% a 2ª ou 3ª série e um professor não opinou. Neste caso, concluímos que o tópico deve ser abordado na 3ª série do Ensino Médio.

As perguntas de números 10 e 11 eram abertas. A de número 10 citava os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), os quais apontam uma orientação do ensino de Física com enfoque na História e Filosofia da Ciência (HFC) e nas relações entre Ciência, Tecnologia e

Sociedade (CTS). A pergunta solicitava aos professores que opinassem se o ensino, segundo essas perspectivas, pode motivar o aluno para os estudos de Física. O professor P₁ respondeu:

Talvez. Alguns alunos ainda têm curiosidade a respeito do funcionamento de aparelhos e sobre como a Ciência se desenvolve; porém, ainda boa parte demonstra certa apatia e desinteresse quando é comentado sobre a história da Ciência. Pode ser a maneira de abordar [...]. Para encontrar um caminho é preciso “testar” algumas abordagens e metodologias para discutir a HFC.

Observa-se que o professor não tem certeza. Citou que alguns alunos têm interesse em saber como os aparelhos funcionam, o que nos leva a inferir que o ensino na perspectiva CTS, na visão do professor, envolve apenas a tecnologia funcional de dispositivos. Quanto à abordagem com enfoque na HFC, o entrevistado argumentou que a apatia e o desinteresse dos alunos podem ser decorrentes da forma de abordagem ou da metodologia utilizadas no ensino de Física. Deduzimos que o docente reconhece que não tem obtido resultados satisfatórios ao abordar a HFC e que necessita conhecer estratégias diferenciadas para a sua prática em sala de aula.

Respondeu o professor P₂:

Sim, pois a História das Ciências contribui para que o aluno tenha uma visão mais contextualiza das Ciências, cujo desenvolvimento não se deu de forma linear. Permite a ele acompanhar o processo de construção dos conceitos e reelaborar seu pensamento [...] de acordo com o conhecimento científico. Ele pode perceber que a Física não é só para “gênios”, que todos têm possibilidades de se apropriar do conhecimento historicamente produzido.

O professor concordou que o enfoque na HFC é relevante para o ensino de Física, contudo não citou o enfoque na perspectiva CTS.

De acordo com a resposta do professor P₃, o ensino nas perspectivas HFC e CTS pode contribuir para o aluno identificar a Física em vários momentos da História, como também a presença e influência da Ciência no dia a dia.

O professor P₄ respondeu:

Acredito que não é só o enfoque ou [...] a metodologia que vão motivar os alunos. É preciso [também] carga horária adequada para que melhore o ensino de Física.

O professor deixou claro o seu descontentamento com a carga horária de Física no Ensino Médio, que considera insuficiente para o ensino dos conteúdos. Na visão do entrevistado, é possível melhorar o ensino de Física desde que a carga horária semanal seja aumentada. Este é um problema que atormenta a maioria dos professores, conforme visto nas respostas à pergunta de número 5. Para ministrar adequadamente o conteúdo de radioatividade, consideramos que são necessárias oito aulas (quatro semanas). Ao levarmos em conta que a média anual de aulas de Física é de 78 a 80, concluímos que seriam necessários cerca de 10% do total da carga horária para ensinar radioatividade no Nível Médio.

Segundo o professor P₅, o ensino com enfoque CTS motiva o estudante para a aprendizagem da Física porque, ao perceber as relações da Física com a tecnologia e a sociedade, o seu interesse pelos estudos muda. O docente considerou que a abordagem na HFC é relevante porque, ao estudar a evolução histórica dos conhecimentos, os estudantes compreendem que a Ciência é uma produção humana, fruto do empenho de vários cientistas.

O professor P₆ afirmou:

Acredito que sim, pois é dado pouco enfoque no “como” e no “por quê” chegou-se aos conteúdos [físicos]. A impressão tida pelos alunos é a de que a Física não está relacionada a nada e não leva a lugar algum [...], logo, que o ensino está desvinculado da História, Tecnologia e Sociedade. O número reduzido de aulas semanais contribui para esta fragmentação.

O professor concordou que o ensino nas perspectivas HFC e CTS pode motivar o estudante para os estudos de Física; contudo, ao ressaltar que “é dado pouco enfoque no ‘como’ e no ‘por quê’ chegou-se aos conteúdos [físicos]”, quer dizer que a abordagem na HFC não é uma constante em sala de aula. Em decorrência, do ponto de vista do entrevistado, os alunos não veem sentido em estudar a Física. O docente também sustenta que o número de aulas reduzido contribui para um ensino fragmentado. Interpretamos fragmentação, nas palavras do entrevistado, como um ensino incompleto, visto que o professor não dá conta de

abordar todos os conteúdos que considera significativos por causa da carga horária insuficiente.

As respostas dos professores P₇, P₈ e P₁₀ também são favoráveis ao ensino com enfoque na HFC e no movimento CTS, mas o professor P₇ complementou que esta forma de abordagem é pouco usual no Ensino Médio.

O professor P₉ argumentou que é relevante abordar a evolução histórica da Ciência, mas considerou que o que “deve ser realmente abordado” é a aplicação da Física no dia a dia. Entendemos, nas palavras do professor, que ele privilegia o enfoque CTS, mas também valoriza a abordagem HFC.

A pergunta de número 11 propunha aos entrevistados a seguinte situação: “Se você tivesse disponível uma proposta para o ensino da radioatividade no Nível Médio, com possibilidade de inserção em sala de aula, você gostaria de pôr em prática?”. Todos responderam que sim. O professor P₅ observou que trabalharia a proposta em sala de aula, mesmo porque o seu projeto do PDE-2012 está ligado à FMC, especificamente à Física das radiações.

Quatro entrevistados, embora tenham respondido que sim, fizeram algumas observações, que descrevemos a seguir.

Respondeu o professor P₁:

Sim. As aulas sobre a Física Clássica ainda têm uma sequência; porém, sobre a radioatividade, embora abordada por alguns [autores de] livros didáticos, necessita de uma proposta. Existem dúvidas em que momento [...], porque será necessário deixar de trabalhar outros conteúdos. Sabemos que diversos alunos apresentam dificuldade em interpretação e em cálculo. [...] Então, preciso de uma sugestão de como agir para que realmente [os alunos] entendam esse conteúdo quando for trabalhado.

Em nossa interpretação, ao afirmar que a Física Clássica tem uma sequência, o professor quer dizer que o saber a ensinar, apresentado nos manuais escolares, tem a característica de operacionalidade, ou seja, os conteúdos são apresentados na forma de exercícios, atividades e tarefas que possibilitam o desenvolvimento dos tópicos; já a radioatividade não é apresentada de forma operacional pelos autores dos livros didáticos, o que dificulta o ensino em sala de aula. O professor também ressalta que, para ensinar o tópico,

deve deixar de lado outro conteúdo de Física Clássica, o que reforça o argumento de que a carga horária reduzida é um dos entraves à inserção da FMC no Nível Médio. O docente deixa evidente que há necessidade de propostas para o ensino da radioatividade, o que corrobora nossas hipóteses iniciais.

Embora o professor P₂ concorde em desenvolver a proposta em sala de aula, ressalta que, para tanto, o docente deve ter uma formação que lhe forneça base sobre os conteúdos pertinentes.

De acordo com a resposta do professor P₈, o tema deve ser abordado no segundo semestre da 3ª série, pois considera que os alunos apresentam mais maturidade e estão mais bem preparados para a aprendizagem do conteúdo.

O professor P₉ argumenta que trabalharia a proposta em sala de aula desde que ele fosse preparado por meio de cursos de formação continuada, de forma a adquirir o conhecimento necessário para o ensino do tópico no Nível Médio. A resposta do professor reforça, conforme já visto, que há falta de cursos de capacitação e atualização na área de FMC, um dos motivos que dificultam a introdução dos conteúdos em sala de aula.

Da análise das respostas das questões 10 e 11 deduzimos que todos gostariam de pôr em prática a proposta para o ensino da radioatividade no Nível Médio, com enfoque nas perspectivas HFC e CTS; todavia percebemos, nas respostas de três professores, alguma preocupação com a carga horária reduzida de Física no Ensino Médio, que poderia comprometer a aplicação da proposta. Dois dos entrevistados sustentam que precisam realizar curso de capacitação e atualização, para que eles sejam efetivamente preparados para o ensino da radioatividade em sala de aula.

As respostas dos dez professores entrevistados às perguntas do questionário nos orientaram para a elaboração da sequência didática. Estruturamos as atividades para que sejam desenvolvidas em oito aulas, privilegiando a abordagem qualitativa, conforme sinalização dos docentes da pesquisa.

5.5. VISÃO GERAL DAS ATIVIDADES DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Após os levantamentos e análises dos livros didáticos e das respostas dos professores ao questionário, elaboramos as atividades da sequência didática, com enfoque na educação científica e tecnológica do aprendiz, associado à evolução histórica e filosófica do

conhecimento físico. Ao elaborarmos as atividades, levamos em consideração as orientações de Santos e Mortimer (2002), de Zabala (1998) e de Ricardo (2010). Classificamos a proposta de ensino entre as categorias 5 e 6, de acordo com as categorias estabelecidas por Aikenhead (1994), apresentadas no capítulo 2º.

A proposta metodológica foi exposta aos professores de Física do PDE-2012 para validação. A versão preliminar foi apresentada no “Curso de Formação dos Professores do PDE: Física – Turma 2012”, no segundo semestre de 2012, com carga horária de doze horas. Uma cópia foi entregue para cada membro do grupo. Durante a apresentação, os professores foram convidados a avaliar a proposta e realizar intervenções pedagógicas, com o intuito de reconstruirmos as atividades. A contribuição dos professores se deu principalmente nas questões propostas aos estudantes, para discussão. As questões foram, então, complementadas e reformuladas. A partir das sugestões do grupo a sequência didática foi reconstruída, de modo que viesse atender às expectativas dos professores. A proposta finalizada encontra-se no capítulo 6º.

Apresentamos, em seguida, uma visão geral das atividades, as quais foram organizadas na forma descrita a seguir.

- ***Introdução do problema social: O acidente radioativo de Fukushima*** (uma aula)

Abordamos o acidente ocorrido na usina nuclear de Fukushima Daiichi, no Japão, em março de 2011, em virtude de um *tsunami* devastador que se seguiu a um intenso terremoto. O evento abalou não apenas a estrutura da usina, mas também a crença de que a energia nuclear é uma alternativa segura para a produção de energia elétrica limpa.

A atividade é trabalhada com imagens e vídeos que mostram o abalo sísmico e o *tsunami*, informações sobre o acidente com os reatores e apresentação de duas entrevistas com os cientistas brasileiros José Goldemberg e Luiz Pinguelli Rosa, da área de Física Nuclear, em que mencionam o tipo de material radioativo que foi liberado no meio ambiente e citam alguns conceitos físicos. A ideia é promover a interação entre o professor e os alunos e motivá-los para o estudo da radioatividade por meio de discussões a respeito das causas e consequências do acidente. Durante o debate o professor tem condições de observar as concepções intuitivas dos estudantes e despertar neles a necessidade de aprender os conteúdos científicos.

Propusemos para discussão com os alunos algumas questões que abordam as causas e possíveis consequências do acidente de Fukushima, o que eles entendem com relação às usinas nucleares e aos conceitos físicos mencionados nos vídeos e entrevistas. Sugerimos levantar questionamentos sobre o que eles sabem com relação à bomba atômica e aos acidentes nucleares de Chernobyl, Three Mile Island e Goiânia, comentados pelos físicos entrevistados. Sugerimos também aplicar a avaliação a grupos pequenos de alunos, durante o desenvolvimento da atividade.

No final da atividade, recomendamos algumas pesquisas a serem realizadas pelos grupos de alunos. Os temas indicados são a bomba atômica, os acidentes nucleares/radioativos mencionados, usinas nucleares, rejeitos radioativos e as aplicações da radioatividade no dia a dia. É conveniente o professor organizar os tópicos com antecedência, com orientações sobre o material e fontes de pesquisa. A ideia é proporcionar ao aluno conhecimentos básicos para as discussões durante a apresentação das atividades 4 e 5.

- ***Breve histórico da radioatividade e da compreensão do fenômeno*** (uma aula)

O debate envolvendo o acidente de Fukushima oportuniza a introdução da história da radioatividade e das primeiras pesquisas que levaram ao entendimento de sua origem. Desse modo, temos a oportunidade de contextualizar os saberes a ensinar para dar significado aos conteúdos de radioatividade. A ideia é discutir com os estudantes os eventos que levaram à descoberta do fenômeno e as contribuições dos cientistas para a compreensão de suas propriedades e de sua natureza, e introduzir os primeiros conceitos físicos. Consideramos importante destacar que a descoberta da radioatividade não se deveu somente a Becquerel, mas foi fruto do trabalho coletivo de vários cientistas ao longo de anos.

Para o desenvolvimento da atividade utilizamos imagens, vídeos e um texto elaborado para os alunos trabalharem em grupos pequenos. Durante a aula sugerimos ao professor envolver os estudantes nas discussões, incentivá-los a formular hipóteses e ajudá-los a obter conclusões. Propomos algumas questões como sugestões para o debate entre os grupos, de modo que façam generalizações e sínteses dos eventos que levaram à descoberta da radioatividade e à compreensão de sua natureza.

- ***Conteúdos escolares*** (duas aulas)

Na atividade anterior introduzimos alguns conceitos de radioatividade, mas de forma breve. Nesta etapa são apresentados os conteúdos escolares que consideramos fundamentais para a compreensão do fenômeno. São os seguintes: modelo atômico didático, estrutura do núcleo atômico, força nuclear, isótopos e radioisótopos, radiação nuclear (alfa, beta, gama), decaimento nuclear, meia-vida radioativa, fissão nuclear, reação em cadeia e energia nuclear.

Durante a abordagem dos conteúdos, o professor tem a oportunidade de trabalhar as concepções intuitivas dos estudantes observadas na aplicação da primeira atividade, de modo a confrontá-las com as científicas. É importante que se faça a relação entre os conceitos físicos e a evolução do acidente com os reatores da usina de Fukushima Daiichi. Esta etapa é fundamental para o aluno entender a natureza das radiações nucleares e sua presença no dia a dia.

Como estratégia didática, fizemos uso de um mapa conceitual para a apresentação do modelo atômico didático, imagens e vídeos. Consideramos que o livro didático pode ser usado como um dos recursos para a abordagem dos conteúdos, caso contenha o tópico *radioatividade*. Como a carga horária semanal de Física é reduzida o professor não precisa passar todo o conteúdo no quadro, mas apenas complementar alguns conceitos fundamentais, se for necessário. Se o livro não apresenta o tópico, sugerimos ao professor disponibilizar um texto com os fundamentos básicos de radioatividade.

Consideramos importante a resolução de exercícios diversificados que envolvam os conteúdos científicos com enfoque nas perspectivas HFC e CTS, como também na Ciência pura. O professor pode selecionar os exercícios propostos no livro didático adotado, como também complementá-los ou elaborar outros. É fundamental que o professor analise, junto com os alunos, as soluções dos problemas e das questões, com vista a esclarecer quaisquer dúvidas, orientá-los e ajudá-los na compreensão dos conceitos, leis e teorias, como também discutir as questões que envolvem a evolução histórica e as aplicações da radioatividade no dia a dia. Não obstante, de acordo com os professores de Física que entrevistamos, a abordagem qualitativa deve prevalecer sobre a quantitativa.

- ***Efeitos, riscos e benefícios da radiação nuclear*** (uma aula)

Nesta etapa o aluno já deve conhecer a natureza da radioatividade e terá condições de discutir, entender e avaliar os riscos/benefícios de sua utilização. As atividades propostas

envolvem a geração de energia elétrica, o que fazer com os rejeitos radioativos, as aplicações na medicina, na indústria, na pesquisa, na agricultura e no ambiente.

Os grupos apresentam uma síntese da pesquisa do tema escolhido antecipadamente, quando foi aplicada a primeira atividade. A ideia é gerar discussões a respeito dos riscos e benefícios do uso da radioatividade para o ser humano e para o meio ambiente. O papel do professor é gerenciar as discussões continuamente, de modo que o debate seja harmonioso e todos tenham a oportunidade de se expressar.

A avaliação pode ser realizada por meio de texto elaborado pelas equipes, da apresentação dos temas e da participação dos grupos nas discussões.

- ***As bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki, os acidentes nucleares de Three Mile Island (EUA) e Chernobyl (Ucrânia) e o acidente radioativo de Goiânia (Brasil)*** (duas aulas)

O horror causado pelas bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki no fim da Segunda Guerra Mundial e os ensinamentos dos acidentes nas usinas nucleares e em Goiânia, não podem ficar à margem das discussões. Questões como o sistema de segurança dos reatores e a responsabilidade de técnicos e autoridades no uso da energia nuclear também devem ser consideradas.

Cada grupo que realizou a pesquisa apresenta uma síntese do tema escolhido. O objetivo é discutir a evolução histórica dos eventos e as consequências dos efeitos danosos produzidos pela radiação nuclear no ser humano e no meio ambiente. O professor conduz o debate destacando os pontos fundamentais e mantendo a interação respeitosa entre todos. Com o desenvolvimento desta atividade, buscamos proporcionar ao aluno elementos para que ele entenda a dimensão do uso incorreto e irresponsável da energia nuclear, e também para que ele avalie criticamente as contradições das aplicações da Ciência.

A avaliação pode ser feita da mesma forma proposta para a atividade anterior, a saber, por meio de texto elaborado pelas equipes, da apresentação dos tópicos e da participação dos grupos nas discussões.

- *Retorno ao problema social original: o acidente radioativo de Fukushima* (uma aula)

O evento de Fukushima Daiichi contribuiu para que cientistas e autoridades pensassem criticamente sobre o uso da fonte de energia nuclear antes e depois do acidente. A retomada das discussões permite ao aluno entender e avaliar com mais profundidade as consequências danosas do despejo de radiação nuclear na população japonesa e, ao mesmo tempo, pensar criticamente sobre a sua responsabilidade social e ética nas tomadas de decisão na sociedade em que vive.

SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA RADIOATIVIDADE NO NÍVEL MÉDIO

6.1. APRESENTAÇÃO: AOS PROFESSORES DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

Organizamos a sequência didática para o ensino da radioatividade no Nível Médio para que seja desenvolvida em seis atividades. O número de aulas previsto é de oito, mas esse número pode variar.

A sequência didática tem como ponto de partida a apresentação de um problema social: o acidente radioativo ocorrido na usina nuclear de Fukushima Daiichi, no Japão, em março de 2011. O acidente foi provocado por um forte terremoto seguido de um impressionante tsunami. O inesperado fenômeno natural danificou quatro dos seis reatores da central do complexo, o que permitiu a liberação de elementos radioativos na região no entorno da usina. Esse evento de Fukushima despertou o temor da sociedade em relação às usinas atômicas e levou a uma séria reavaliação sobre o uso da energia nuclear para a geração de energia elétrica.

A partir da situação-problema, estruturamos as demais atividades. Procuramos elaborar a sequência didática de forma que o professor seja capaz de verificar se os alunos estão compreendendo os conteúdos conceituais e, sobretudo, se os objetivos educacionais estão sendo atingidos.

Justificativa

Entendemos que o evento de Fukushima Daiichi é significativo para os alunos. Assim, a partir da problematização envolvendo o acidente, busca-se promover um ensino contextualizado dos conteúdos conceituais de radioatividade, com enfoque na História e Filosofia da Ciência e no movimento Ciência – Tecnologia - Sociedade.

Objetivos gerais

Constituem-se como objetivos gerais:

- promover a interação entre professor e alunos e motivá-los para o estudo da radioatividade a partir do debate das causas do acidente, como, também, das consequências da radiação nuclear para o meio ambiente e para a população que vivia na região próxima à usina nuclear;
- promover a aprendizagem dos conteúdos conceituais de radioatividade;
- debater sobre os efeitos biológicos nocivos da radiação nuclear no ser humano;
- discutir os benefícios das aplicações da radioatividade na medicina, indústria, agricultura, pesquisa e ambiente;
- contribuir para a formação de cidadãos compromissados com questões sociais, em que a Ciência e a tecnologia desempenham papel de fundamental importância para a qualidade de vida da sociedade e para a preservação do meio ambiente.

Público-alvo:

Alunos do 3º ano do Ensino Médio.

Metodologia

A sequência didática proposta busca promover uma educação problematizadora, como forma de estabelecer relações de diálogo entre professor e alunos, com a efetiva participação de todos. Para isso, propomos atividades inter-relacionadas que contemplem os aspectos conceituais, sociais, tecnológicos e históricos que envolvam a radioatividade.

Para o desenvolvimento das atividades, escolhemos textos para leitura e discussão, mapas conceituais e pesquisas em grupo. Nestes casos, sugerimos ao professor formar os grupos de alunos antes de dar início às atividades. Como recursos tecnológicos e audiovisuais, optamos por vídeos, imagens e experimentos virtuais.

Papel do professor

O papel do professor é promover o debate produtivo e harmonioso entre os grupos de alunos, de forma a dar espaço à liberdade intelectual de cada um, estabelecer tarefas e criar regras de conduta, com a intenção de alcançar os objetivos de ensino.

Avaliação

A avaliação, tanto individual quanto em grupo, é um instrumento imprescindível de aprendizagem, uma vez que o professor pode usá-la para o educando avançar na construção dos saberes. Ademais, a avaliação permite ao aluno refletir se realmente aprendeu e se o seu empenho valeu a pena. Propomos, então, a avaliação contínua durante o desenvolvimento das atividades, de forma que o professor tenha condições de verificar se os alunos estão realmente compreendendo os conteúdos trabalhados e se os objetivos educacionais estão sendo atingidos. Sugerimos ao professor propor questões para avaliar os grupos de alunos durante o desenvolvimento de cada atividade, pesquisas em equipe para apresentação em sala de aula e avaliações individuais envolvendo os conteúdos conceituais.

6.1.1. Esquema de organização da sequência didática

As atividades da sequência didática estão organizadas da seguinte forma:

ATIVIDADES	TEMAS	Nº DE AULAS
Atividade 01	<ul style="list-style-type: none">• Introdução do problema social: O acidente radioativo de Fukushima.	1
Atividade 02	<ul style="list-style-type: none">• Radioatividade: um breve histórico.	1
Atividade 03	<ul style="list-style-type: none">• Conteúdos propostos para o Ensino Médio.	2
Atividade 04	Apresentação de pesquisas realizadas pelas equipes de alunos sobre: <ul style="list-style-type: none">• Radiações nucleares: efeitos, riscos e benefícios - aplicações na medicina, indústria, agricultura, pesquisa, ambiente.	1

Atividade 05	Apresentação de pesquisas realizadas pelas equipes de alunos sobre: <ul style="list-style-type: none"> • Bombas atômicas. • Acidentes nucleares e radioativos. 	2
Atividade 06	<ul style="list-style-type: none"> • Retorno ao problema social original: consequências do acidente radioativo de Fukushima e as perspectivas do uso da energia nuclear para a geração de eletricidade. 	1

Quadro 11: Esquema de organização das atividades da sequência didática.

6.1.2. Encaminhamentos das atividades

O mapa conceitual da figura abaixo mostra os encaminhamentos das atividades da sequência didática.

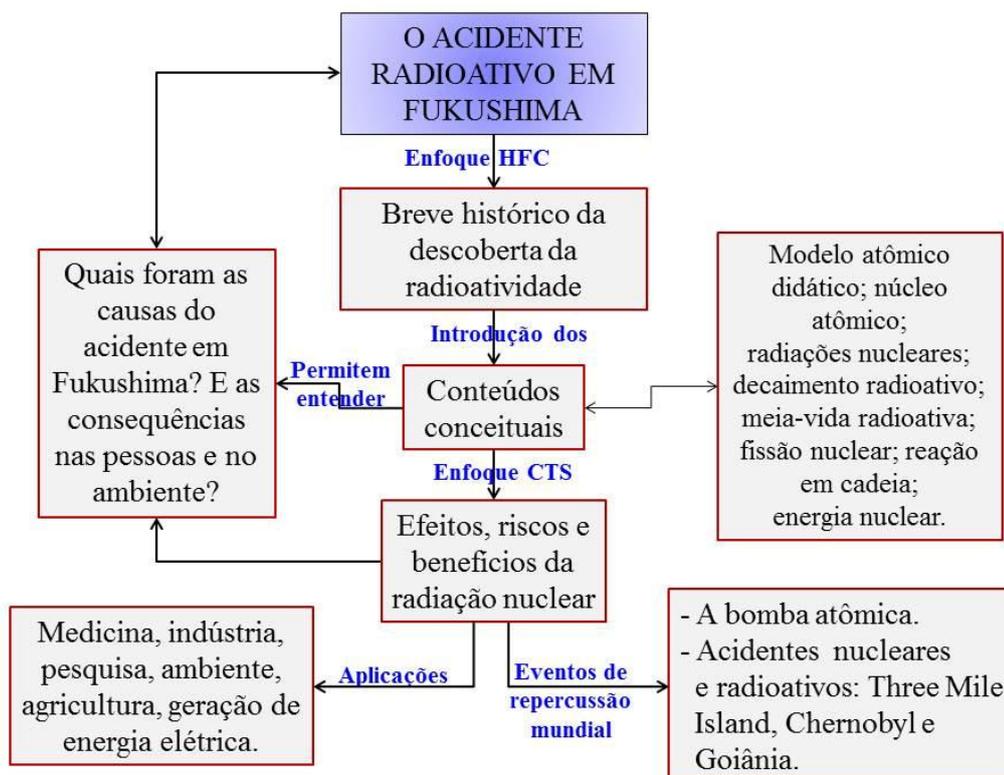


Figura 10: Encaminhamentos das atividades da sequência didática.

6.2. ATIVIDADE 1

INTRODUÇÃO DO PROBLEMA SOCIAL: O ACIDENTE RADIOATIVO DE FUKUSHIMA

Papel do professor

Durante a apresentação de imagens e vídeos relacionados ao acidente radioativo de Fukushima, sugere-se ao professor conduzir o debate entre os alunos por meio de questionamentos e argumentações, de modo a motivá-los para o estudo da radioatividade. Na seção “para refletir e discutir”, apresentamos algumas sugestões para as discussões. É importante destacar as causas do acidente, os danos causados pelo tsunami aos reatores da usina nuclear e os efeitos da radiação na população e no meio ambiente. Os vídeos são complementados com depoimentos de cientistas a respeito dos efeitos nocivos da radiação no meio ambiente e no ser humano. O professor também tem a oportunidade de observar as concepções prévias dos alunos em relação ao tema, para depois trabalhá-las no momento oportuno.

O que se espera

Com base nas respostas e argumentações, o professor terá condições de avaliar o que os alunos sabem sobre o evento de Fukushima, como, também, de observar que conceitos prévios os alunos têm com relação à radioatividade. Esse levantamento permitirá ao professor estabelecer as bases para o ensino-aprendizagem dos conteúdos conceituais fundamentais.

Material didático-pedagógico e estratégias

- Texto para discussão em grupo
- Vídeos
- Imagens
- Projetor multimídia

ENCAMINHAMENTO DA ATIVIDADE 1

TEXTO: O ACIDENTE RADIOATIVO DE FUKUSHIMA

Os incidentes altamente indesejáveis e de grande repercussão são conhecidos como “**cisnes negros**”. Mesmo com muito planejamento, “a energia nuclear sempre será vulnerável a eventos cisne negro. [...] Um acontecimento raro é difícil de prever, oneroso de planejar e fácil de camuflar nas estatísticas. Principalmente um que nunca aconteceu.” (PIORE, 2011, p. 8).

No dia 11 de março de 2011, ocorreu, no Japão, às 14h46min do horário local, um evento cisne negro. Um **terremoto** de magnitude 8,9 pontos na escala Richter²⁵, seguido de eventos não previstos, causou o pior acidente com uma usina nuclear depois de Chernobyl, em 1986. O epicentro foi a 24,4 quilômetros abaixo do solo do Oceano Pacífico, a 130 quilômetros da costa leste japonesa e a 370 quilômetros da capital, Tóquio. Foi o maior terremoto já registrado no país e o sétimo maior do mundo.

- Apresentar **VÍDEO 1** – “*Terremoto no Japão: Jornal Nacional 11-03-2011*” -YouTube.
Duração: 03min50s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=LaJeyqYQl5g>.

O Japão está sobre o Anel de Fogo do Pacífico, uma falha geológica que provoca a mais intensa atividade sísmica do globo terrestre. O sismo foi provocado quando a placa do Pacífico chocou-se contra a placa Norte-Americana, gerando um tremor seguido de várias réplicas.

²⁵ A escala Richter é uma escala logarítmica de base 10, que mede a magnitude sísmica de terremotos. Inicia no grau zero e não existe limite máximo (teoricamente), embora não haja registros de terremotos acima de 10 graus. Um terremoto com magnitude 6 na escala Richter, por exemplo, é 10 vezes mais intenso do que um de grau 5. A escala foi criada em 1935 pelos sismólogos Charles Francis Richter e Beno Gutenberg, ambos do Instituto de Tecnologia da Califórnia, EUA.

Entenda o terremoto no Japão



Figura 11: Mapa indicando o ponto onde ocorreu o epicentro do terremoto na costa leste do Japão, em 11/03/2011. Fonte: http://4.bp.blogspot.com/-IXX8fCOUkmw/TfNSh1aZFeI/AAAAAAAAACdo/PZBALVchU_M/s1600/japaov31.jpg

O terremoto foi somente o início de uma tragédia maior, já que o movimento das placas tectônicas empurrou as águas oceânicas para cima e depois para os lados, gerando ondas gigantes conhecidas como *tsunami*. Segundo Soares (2011), as ondas alcançaram 10 metros de altura, entretanto, há estimativas de que as ondas chegaram a atingir alturas de até 15 metros (PIORE, 2011).

- Apresentar **VÍDEO 2:** “*Tsunami Japan real video 2 compilation*”- YouTube.
Duração: 03min02s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=y0ajWtrs3YY>.

O complexo nuclear da cidade de **Fukushima**, na costa leste do Japão, possui as unidades de Daiichi (Fukushima I) e Daini (Fukushima II) e foi construído para suportar terremotos de magnitude 8,2 graus, portanto, um sismo de 8,9 graus estava dentro de sua margem de segurança (PIORE, 2011). Entretanto, o quebra-mar para contenção de *tsunamis* foi construído para suportar ondas de até 5,7 metros de altura (GUNDERSEN, 2012).

Áreas afetadas pelo terremoto e tsunami no Japão



Figura 12: Mapa ilustrando o epicentro do terremoto e a localização do complexo nuclear de Fukushima Daiichi.

Fonte: <http://s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2>



Figura 13: Vista aérea da usina nuclear de Fukushima I e do quebra-mar, antes de 11/03/2011.

Fonte: http://4.bp.blogspot.com/-FSPiczz-egQ/TXvLyv-gTeI/AAAAAAAAAnY/wHLg8YPS_II/s1600/r

De acordo com o relatório da Central Nuclear de Fukushima Daiichi (ACRO, 2011), 41 minutos após o terremoto, a primeira onda com 4 metros de altura foi detida pela barragem, entretanto, 8 minutos mais tarde, gigantescas ondas ultrapassaram o quebra-mar e invadiram a usina de Fukushima I, danificando o **sistema de refrigeração**. Às 16h46min, hora local, o governo japonês declarou situação de emergência nuclear.



Figura 14: Momento em que as ondas do tsunami ultrapassaram a barragem de contenção e inundaram a central nuclear de Fukushima Daiichi.

Fonte: [http://4.bp.blogspot.com/-](http://4.bp.blogspot.com/-zHIwKqk_oc/Tde1mGBA6RI/AAAAAAAAAWg/QeqgjI7SSXk/s640/fukushima_0519_01.jpg)

[zHIwKqk_oc/Tde1mGBA6RI/AAAAAAAAAWg/QeqgjI7SSXk/s640/fukushima_0519_01.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-zHIwKqk_oc/Tde1mGBA6RI/AAAAAAAAAWg/QeqgjI7SSXk/s640/fukushima_0519_01.jpg).

A central de Daiichi possui seis **reatores nucleares**, sendo que três deles estavam em operação no momento em que o terremoto ocorreu. Os edifícios que abrigavam os reatores de números 1, 2 e 3 sofreram explosões em virtude do acúmulo de hidrogênio, que destruíram parcialmente as paredes dos prédios. O quarto reator, que estava inoperante, sofreu um incêndio em um tanque de combustível irradiado (BIELLO, 2011; MATSON, 2011).

Assim que ocorreu o intenso sismo, “apagões” em vários lugares do país interromperam o fornecimento normal de **energia elétrica**. Embora os reatores tenham-se desligado automaticamente durante o tremor, o sistema de refrigeração deveria continuar funcionando por meio de geradores de emergência, mas não foi o que aconteceu na estação de Daiichi. A inundação danificou os geradores a diesel e interrompeu o sistema automático de refrigeração. O reator nº 1 foi o primeiro a apresentar aquecimento em níveis perigosos; por esta razão, os técnicos japoneses procuraram ligar os geradores-reserva para reativar o resfriamento, mas a tentativa não foi bem sucedida.

Mesmo quando desligado, um reator continua se superaquecendo²⁶ e, por isso, deve ser resfriado para não derreter. O derretimento de um reator é o pior acidente que pode acontecer em uma usina nuclear, uma vez que a explosão lança na atmosfera grandes

²⁶ Uma vez iniciada a reação de fissão nuclear do combustível radioativo, não é possível extingui-la instantaneamente, uma vez que a taxa de desintegração diminui gradativamente.

quantidades de materiais radioativos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente. Foi o que aconteceu, por exemplo, em Chernobyl, na Ucrânia.

Para minimizar o problema na central de Fukushima I, os técnicos abriram as válvulas do reator nº 1 para liberar o **vapor radioativo** acumulado e diminuir a pressão interna. No dia seguinte ao terremoto, houve a **explosão** no edifício que abrigava o reator: o equipamento não foi danificado, porém, quatro trabalhadores ficaram feridos (ACRO, 2011).



Figura 15: Edifício do reator nº 1 após a explosão ocorrida no dia 12/03/2011.

Fonte: <http://s.glbing.com/jo/g1/f/original/2011/03/13/1.jpg>.

- Apresentar **VÍDEO 3:** “Entenda o problema nos reatores de Fukushima” – YouTube.

Duração: 01min12s.

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

No dia 14 de março, ocorreu a explosão no edifício do reator nº 3. Onze trabalhadores ficaram feridos, sendo que três deles foram rejeitados pelos hospitais da região por medo de contaminação, embora eles não estivessem fortemente contaminados. As barras de combustível do reator, com 4 metros de altura, ficaram expostas (descobertas) a uma altura de 2,95 metros, aumentando o **risco de explosão e vazamento de radiação**. No dia 15, aconteceu uma nova explosão, desta vez no prédio do reator nº 2, o que levou o gerente a evacuar 650 trabalhadores da usina de Daiichi, permanecendo apenas 50 funcionários no local (ACRO, 2011).

Nos dias que se seguiram, engenheiros, técnicos e militares japoneses conseguiram evitar, heroicamente, um acidente pior, bombeando água do mar para refrigerar os reatores. A

operação foi muito trabalhosa e de alto risco. Caminhões de bombeiros e até helicópteros do exército foram usados na operação, expondo todos os envolvidos à **contaminação pelos vapores radioativos** expelidos das instalações danificadas. A água misturada com boro foi injetada, aos poucos, nos reatores para controlar a temperatura e, com esse procedimento, os japoneses conseguiram evitar o derretimento das barras de combustível nuclear e a explosão dos reatores. Contudo, os vapores radioativos, que foram liberados na atmosfera para diminuir a pressão dos reatores, contaminaram a região no entorno do complexo nuclear de Fukushima, afetando o meio ambiente, os trabalhadores e as pessoas que ali viviam. Os níveis de radiação flutuaram drasticamente durante a crise, porém, a extensão dos danos causados à saúde das pessoas e ao meio ambiente ainda está sendo estudada.

- Apresentar **VÍDEO 4** – “*Terremoto no Japão: cresce a preocupação com as usinas nucleares*”- YouTube. Entrevista com o físico nuclear Luis Pinguelli Rosa, da UFRJ.

Duração: 04min13s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=e93Ke5ktbHU>.

- Apresentar **VÍDEO 5** – “*Japão: consequências da radiação*” – YouTube. Entrevista com o físico nuclear José Goldemberg. Duração: 03min05s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=z9p5oVuFwu0>.

Para refletir e discutir

- 1) De acordo com as imagens e vídeos apresentados, quais foram as causas do acidente radioativo em Fukushima?
- 2) Você sabe identificar qual é a peça-chave de uma usina nuclear, para que serve e que combustível é utilizado para o seu funcionamento?
- 3) O que aconteceu aos reatores n^{os} 1, 2 e 3, culminando no vazamento de radiação nuclear na atmosfera? Houve explosão nuclear? Comente a esse respeito.
- 4) A radiação nuclear é nociva ao meio ambiente e ao ser humano? O que você sabe a esse respeito?
- 5) Você sabe dizer por que um reator nuclear, mesmo desligado, continua se superaquecendo?
- 6) O vídeo 4 mostra uma entrevista com o físico nuclear Luis Pinguelli Rosa, da UFRJ, e o vídeo 5 apresenta uma entrevista com o físico nuclear José

Goldemberg. Os cientistas mencionam formas de radioatividade liberadas pelos reatores na atmosfera, em virtude do acidente. Que formas de radiação são essas?

- 7) De acordo com os físicos nucleares entrevistados, o que a radiação nuclear pode causar ao ser humano? E no ambiente, quais são as consequências da contaminação radioativa mencionadas pelos cientistas?
- 8) Pinguelli Rosa fala de fissão nuclear, produtos de fissão e desintegração radioativa. Você sabe explicar esses conceitos físicos?
- 9) O físico Pinguelli Rosa menciona os acidentes de Chernobyl e Goiânia. Você já ouviu falar desses acidentes? Comente o que você sabe a esse respeito.
- 10) E o que você sabe sobre as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki, no Japão, no final da Segunda Guerra Mundial? Comente sobre isso.
- 11) De acordo com Goldemberg, após o acidente de Fukushima, o mundo verá com outros olhos a utilização da energia nuclear. Você concorda com Goldemberg? Podemos afirmar que as usinas nucleares são 100% seguras? O que você pensa a esse respeito?

Para pesquisar em grupo

Propomos algumas pesquisas para serem desenvolvidas em equipes, com o intuito de preparar o aluno para o exercício da cidadania. Sugerimos ao professor organizar os grupos logo ao final da atividade 1, orientar sobre as fontes de pesquisa, formas de apresentação dos trabalhos e tempo máximo para cada equipe. A ideia é proporcionar aos alunos conhecimentos básicos para as discussões durante as apresentações das atividades 4 e 5.

Os temas que recomendamos são os seguintes:

- Funcionamento básico de um reator e de uma usina nuclear.
- Rejeitos radioativos e a sua destinação.
- Aplicações da energia nuclear na medicina.
- Aplicações da energia nuclear na indústria.
- Aplicações da energia nuclear na agricultura.
- Datação por carbono-14.

- O Projeto Manhattan. Pesquisar sobre o Projeto e o contexto social e político que levou o governo dos Estados Unidos da América a fabricar e lançar as bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki.
- As Bombas Atômicas de Hiroshima e Nagasaki. Investigar sobre as consequências imediatas provocadas pelas bombas atômicas e os efeitos biológicos da radiação produzidos na população das cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki.
- O acidente nuclear de Chernobyl, Ucrânia (1986).
- O acidente radioativo de Goiânia, Brasil (1987).
- O acidente nuclear de Three Mile Island, EUA (1979).

Sugestões de vídeos complementares para o desenvolvimento da atividade:

DAY when tsunami struck - Japan 2011. YouTube. 19min58s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=eeLlySDmjuw>. Acesso em: 27 nov. 2012.

MAPA de visualizacion de todos los terremotos de 2011 em Japón. YouTube. 09min57s: color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=aeCb8QVHL4o>. Acesso em: 29 nov. 2012.

6.3. ATIVIDADE 2

RADIOATIVIDADE: UM BREVE HISTÓRICO

Papel do professor

O papel do professor é envolver os estudantes nas discussões a respeito dos eventos que culminaram na descoberta da radiação nuclear e das contribuições dos cientistas que levaram à compreensão das propriedades físicas do fenômeno. É fundamental destacar que a descoberta da radioatividade não foi devida ao acaso por Becquerel, mas, sim, fruto do trabalho coletivo de vários cientistas ao longo de anos. É importante também discutir sobre os efeitos danosos percebidos nas pessoas que tiveram os primeiros contatos com a radiação nuclear.

O que se espera

Ao discutir o contexto sócio-histórico-cultural em que ocorreu a compreensão do fenômeno da radioatividade, espera-se que o aluno perceba o aspecto não linear da Ciência, contrapondo a ideia de Ciência pronta, imutável e acabada. Espera-se que o estudante entenda que a Ciência é uma construção humana, caracterizada por leis, teorias e princípios elaborados pelo homem ao interpretar os fenômenos naturais. Espera-se, ainda, que o aluno reconheça o caráter do trabalho coletivo de cientistas, do intercâmbio e do debate crítico de ideias.

Material didático-pedagógico e estratégias

- Texto para discussão em grupo
- Imagens e vídeos
- Projetor multimídia

ENCAMINHAMENTO DA ATIVIDADE 2

TEXTO – RADIOATIVIDADE: UM BREVE HISTÓRICO

Do tubo de Crookes aos raios X

No final do século XIX, cientistas pesquisavam a condução de eletricidade em gases e, para isso, utilizavam uma ampola de vidro contendo um gás, com eletrodos nas duas extremidades. A corrente elétrica era detectada quando uma diferença de potencial era aplicada entre os eletrodos metálicos, porém, os cientistas observaram que mesmo com um gás rarefeito no interior da ampola, o amperímetro indicava a passagem de corrente elétrica e isso despertou o interesse do químico e físico inglês **William Crookes** (1832-1919).

Crookes construiu uma ampola fazendo vácuo em seu interior, que ficou conhecida por “ampola de Crookes”. O tubo era constituído por dois eletrodos metálicos dispostos em suas extremidades, aos quais se aplicava uma diferença de potencial (ddp). O cientista inglês

percebeu que a parede de vidro, onde os raios incidiam, tornava-se luminescente, com um brilho amarelo-esverdeado, todavia, não conseguiu explicar tal luminescência.



Figura 16: Tubo de Crookes.

Fonte: http://www.cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm.

- Apresentar **VÍDEO 6:** “*Crookes Maltese Cross tube*” – YouTube.
Duração: 00min41s.
Fonte: http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI.

Em 1897, o físico inglês Joseph John **Thomson**, ao realizar novos experimentos, mostrou que, de fato, os raios catódicos são partículas com carga negativa, as quais foram chamadas de **elétrons**²⁷. Thomson estabeleceu que os elétrons têm massas muito menores que as do átomo, então, essas partículas são subatômicas. A partir de medições cuidadosas feitas com o tubo de descarga, o físico conseguiu determinar que todos os elétrons são iguais e supôs que possuem massa bem definida muito menor que a do átomo (HEWITT, 2011).

- Apresentar **VÍDEO 7:** “*Descoberta do elétron*” – YouTube.
Duração: 04min20s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen>.
- Apresentar **VÍDEO 8:** “*Rayos catódicos*” – YouTube. Duração: 02 min.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen&NR=1>.

²⁷ O elétron, a primeira partícula subatômica detectada, já havia sido prevista teoricamente, em 1874. Em 1891, George Johnstone Stoney batizou-a de elétron (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

A detecção do elétron foi o primeiro indício de que **o átomo não é indivisível**. Ora, se havia uma partícula subatômica com carga negativa, então seria necessário que existisse outro tipo de partícula que fosse positiva para manter a neutralidade da matéria. As conclusões que resultaram a partir da detecção do elétron levaram à elaboração dos **modelos atômicos** de Nagaoka em 1903, de Thomson em 1904, de Rutherford em 1911 e de Bohr em 1913.

Entre os vários cientistas que se dedicavam às pesquisas com os raios catódicos, estava Philipp Lenard. Lenard modificou o tubo de Crookes colocando uma janela de alumínio por onde os raios catódicos podiam escapar para o exterior. Defronte à janela, posicionou um anteparo fluorescente e verificou que até uma distância de 8 centímetros, ele detectava luminescência devida aos raios catódicos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Em 1895, Wilhelm Conrad **Röntgen** (1845-1923), físico alemão experimental, dedicava-se aos estudos com tubos de descarga (ampola de Crookes). Röntgen repetiu o experimento de Lenard, embrulhando o tubo com papel preto para que a luminescência no vidro não atrapalhasse a visão no anteparo fluorescente. Apagou a luz do laboratório e foi afastando o anteparo fluorescente até 2 metros de distância do tubo, observando que a luminescência persistia. Ligou e desligou o tubo várias vezes, e toda vez que desligava, a luminescência desaparecia. Suas observações levaram-no a concluir que os raios que emanavam do tubo não eram os raios catódicos, mas um tipo diferente de radiação. Esses novos raios eram mais penetrantes e não sofriam desvios na presença de campos elétricos ou magnéticos.



Figura 17: Wilhelm Conrad Röntgen.

Fonte:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/Wilhelm_Conrad_R%C3%B6ntgen_%281845--1923%29.jpg.

Segundo Okuno e Yoshimura (2010), Röntgen realizou experimentos colocando diversos materiais entre o tubo e o anteparo. Observou que os raios emitidos tinham grande capacidade de atravessar desde livros, madeiras, placas metálicas com diferentes espessuras e até certos líquidos. Ao colocar um material diante do tubo, percebeu, atônito, o contorno dos ossos de seus dedos na tela fluorescente.

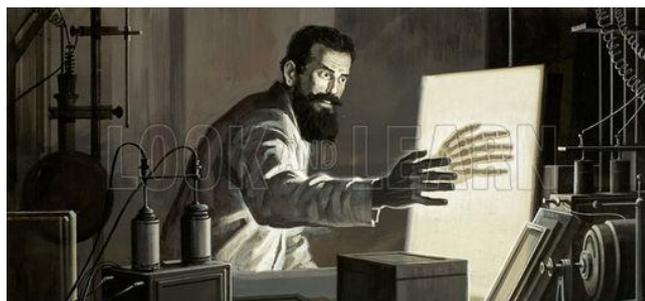


Figura 18: Ilustração representando as observações de Röntgen ao colocar a mão entre o tubo de Crookes e o anteparo.

Fonte: <http://www.lookandlearn.com/blog/1560/rontgen-discovers-x-rays/>.

No dia 22 de dezembro de 1895, Röntgen radiografou a mão esquerda de sua esposa, Anna Bertha, que permaneceu estática durante 15 minutos de exposição. Foi a **primeira radiografia** de um membro do corpo humano em vida, inclusive, mostrando claramente a aliança que usava em sua mão. A famosa radiografia (raio X) encontra-se exposta no Deutsches Museum (Alemanha).



Figura 19: Raio X da mão da Sr.^a Anna Bertha Ludwig, esposa de Röntgen.
Fonte: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/First_medical_X-ray_by Wilhelm R%C3%B6ntgen_of_his_wife_Anna_Bertha_Ludwig's_hand - 18951222.gif](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/First_medical_X-ray_by_Wilhelm_R%C3%B6ntgen_of_his_wife_Anna_Bertha_Ludwig's_hand_-_18951222.gif).



Figura 20: Ilustração dos raios X da mão direita de Albert von Kölliker, presidente honorário da Associação de Física e Medicina de Würzburg.

A imagem foi feita por Röntgen e apresentada à Associação durante a exposição do relatório sobre a descoberta dos raios X, em 23 de janeiro de 1896.

Fonte: <http://images.encydia.com/thumb/e/e4/Roentgen-x-ray-von-kollikers-hand.jpg/250px-Roentgen-x-ray-von-kollikers-hand.jpg>.

Röntgen batizou o novo fenômeno de **raio X**, por questão de brevidade e por não saber o que era. A notícia da detecção do fantástico fenômeno foi publicada na primeira página de um jornal de Viena, em 5 de janeiro de 1896, e correu rapidamente o mundo.

A radiação natural de elementos químicos

A detecção da radioatividade é atribuída a Antoine Henri **Becquerel** (1852-1908), físico francês descendente de uma ilustre família de cientistas; todavia, há indícios de que o pesquisador não reconheceu que o efeito que havia observado em seus experimentos tratava-se, na verdade, de um fenômeno ainda desconhecido.



Figura 21: Antoine Henri Becquerel.

Fonte: http://www.websters-dictionary-online.com/images/wiki/wikipedia/commons/thumb/a/a3/Henri_Becquerel.jpg/225px-Henri_Becquerel.jpg.

Na época, sabia-se que existiam semelhanças muito grandes entre os raios X e os raios ultravioletas. Em virtude dessas semelhanças, pensou-se que os raios X poderiam ser um novo tipo de onda eletromagnética de alta frequência (MARTINS, 2012).

Em 1896, após tomar conhecimento da nova radiação observada por Röntgen, Becquerel passou a investigar compostos de urânio que se tornavam fluorescentes após receber luz solar. A hipótese (falsa) de Becquerel era a mesma de seus colegas, ou seja, a de que os compostos de urânio também emitiam raios X, assim que ocasionassem forte fluorescência ao atingirem certas substâncias. Para comprovar sua ideia, Becquerel colocou uma amostra de uma substância luminescente - o sulfato duplo de urânio e potássio - sobre uma placa fotográfica envolta em duas folhas de papel negro muito espesso e a expôs à luz solar no peitoril da janela por várias horas. As primeiras experimentações sugeriam que o material emitia raios X, pois a silhueta da amostra aparecia na placa revelada; contudo, durante um período de tempo nublado, ao guardar uma amostra em uma gaveta sem incidência de luz durante sete dias, observou que a chapa fotográfica também ficara impressionada. Becquerel, porém, não reconheceu nada de novo nessas observações e, assim, continuou a basear suas explicações em fenômenos conhecidos.

- Apresentar **VIDEO 9** : *Ponto Ciência – Experimento de Becquerel* – YouTube.
Duração: 06min47s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=Do-p-GdWUc0>.

De acordo com a interpretação de Martins (2012), foi o casal **Marie Curie** e **Pierre Curie** que deu as principais contribuições ao estudo da radioatividade. Marie Sklodowska Curie (1867-1934), uma estudante de física e química entusiasmada com o fenômeno descoberto por Becquerel, em 1897 resolveu escrever sua tese de doutorado sobre o tema (FUCHS, 1972). Estudou vários minerais e substâncias químicas puras e foi quem usou pela primeira vez o termo **radioatividade**.



Figura 22: Marie Curie.

Fonte: <http://reich-chemistry.wikispaces.com/Fall.2008.MM>
[A.Gels.Forte.Timeline.](#)

Em 1898, Marie Curie e Pierre Curie conseguiram separar finos traços de um elemento 400 vezes mais radioativo do que o urânio, ao qual chamaram de *polônio* em homenagem à Polônia, país natal de Marie Curie. E juntamente com Gustave Bémont, o casal Curie detectou outro elemento 900 vezes mais ativo do que o urânio, ao qual chamaram de *rádio*, pois parecia ser mais radioativo do que qualquer outro elemento (FUCHS, 1972; MARTINS, 1998).

O fenômeno da radioatividade, entretanto, ainda não estava explicado, já que muitas perguntas continuavam sem respostas: Afinal, as radiações eram iguais aos raios X ou não? De onde vinha a energia desses materiais radioativos? Por que alguns elementos eram radioativos e outros não?

O jovem físico neozelandês Ernest **Rutherford** (1871-1937), da Universidade McGill de Montreal, Canadá, em 1898, também iniciou estudos para entender os *raios de Becquerel*. No início de 1899, ao realizar experimentos com substâncias radioativas, observou que emitiam dois tipos de radiação, identificadas a partir da trajetória de cada uma delas ao passar em um campo magnético. Rutherford classificou-as de acordo com a capacidade de penetrar a matéria: a menos penetrante chamou de **raios alfa** (α) e a mais penetrante de **raios beta** (β) (OKUNO, 2007), pois, a princípio, pensou que essas radiações eram tipos diferentes de raios X. Em 1900, Paul Villard identificou um terceiro tipo de radiação muito mais penetrante, chamada de **raios gama** (γ) que, ao contrário dos raios alfa e beta, não sofria qualquer deflexão em campos magnéticos. Três anos depois, Rutherford observou que a radiação alfa era defletida elétrica e magneticamente, e concluiu que se tratava de partículas com carga elétrica positiva (MARTINS, 1998).



Figura 23: Ernest Rutherford.

Fonte:

<http://operamundi.uol.com.br/media/images/Ernest%20Rutherford.jpg>.

Posteriormente a esses estudos, a natureza da radioatividade começou a ficar mais clara. As explicações foram surgindo gradualmente ao longo dos primeiros anos do século XX, por meio de contribuições de vários cientistas que estudaram os raios emitidos por núcleos radioativos. Concluiu-se que os raios α são núcleos do átomo do elemento Hélio, composto por dois prótons e dois nêutrons e, logo depois, que os raios β podem ser de dois tipos: elétrons ou pósitrons. Mais tarde, constatou-se que os raios γ são fótons ou ondas eletromagnéticas muito energéticas, de comprimento de onda muito pequeno. Concluiu-se, então, que os *raios de Becquerel* não eram diferentes tipos de raios X, mas sim, **radiações nucleares**, visto que são originadas dentro do núcleo atômico.

Para refletir e discutir

- 1) O que levou William Crookes a construir um tubo de vidro evacuado, conhecido como tubo de Crookes?
- 2) Crookes, ao aplicar uma alta diferença de potencial entre os eletrodos do tubo, observou um fenômeno inesperado na parede de vidro onde os raios incidiam. Que fenômeno Crookes observou? Como o fenômeno ficou conhecido? O cientista conseguiu explicar a natureza do fenômeno?
- 3) Em 1897, o físico inglês J. J. Thomson realizou experimentos com o tubo de Crookes. Seus estudos o levaram a importantes conclusões a respeito dos raios

catódicos. Que conclusões foram estas? Quais foram as contribuições de Thomson para a compreensão da estrutura da matéria? Justifique.

- 4) Em 1895, o físico experimental alemão Wilhelm Röntgen trabalhava com um tubo de Crookes, modificado por Lenard, para estudar os raios catódicos, quando observou a emissão de uma radiação ainda desconhecida. Que fenômeno foi observado por Röntgen? Röntgen conseguiu explicar a origem da nova radiação?
- 5) O casal Marie Curie e Pierre Curie realizou experimentos com vários minerais e substâncias químicas puras. Quais são os dois elementos químicos radioativos detectados pelo casal Curie?
- 6) O jovem físico neozelandês Ernest Rutherford e seus colaboradores realizaram importantes experimentos com materiais radioativos que contribuíram para a compreensão da natureza da radioatividade. O que Rutherford e equipe identificaram nos experimentos?
- 7) A detecção da radioatividade é normalmente atribuída ao físico francês Henri Becquerel. O que você pode argumentar a esse respeito?

6.4. ATIVIDADE 3

RADIOATIVIDADE: CONTEÚDOS PROPOSTOS PARA O ENSINO MÉDIO

Papel do professor

Nesta etapa, é realizada a transposição didática dos conteúdos científicos para conteúdos escolares. A interação professor-aluno é fundamental, a fim de se construir um ambiente que contribua para um ensino contextualizado e dê sentido ao estudo da radioatividade. Durante o diálogo, o professor tem a possibilidade de identificar as concepções prévias dos estudantes e direcionar o debate entre os grupos. Os aspectos desconhecidos e problemáticos para o aluno devem ser explorados, de modo a situá-lo diante da necessidade de adquirir um conhecimento que ele ainda não possui. Ao mesmo tempo, o professor tem a oportunidade de levar o aluno a vislumbrar a possibilidade de alcançar tal

conhecimento. É importante que o educando se sinta à vontade para perguntar, para expor suas hipóteses e ideias, como também para responder aos questionamentos.

As discussões envolvendo os grupos, as generalizações, sínteses e conclusões permitem ao professor introduzir os conceitos, as leis, os modelos e os princípios físicos envolvidos.

Conteúdos propostos

Ao levarmos em consideração o que os professores pensam e vivenciam com relação ao ensino do tema, propomos nesta atividade, os conteúdos básicos para o estudo da *radioatividade* no Ensino Médio que o professor poderá abordar em sala de aula. A obra de Okuno e Yoshimura (2010) nos orientou na escolha. O texto é apresentado de modo resumido, porém, expomos os conteúdos de forma mais detalhada no **Apêndice A**. Os conteúdos conceituais selecionados são os seguintes:

- (i) o modelo atômico didático;
- (ii) o núcleo atômico;
- (iii) isótopos e radioisótopos;
- (iv) radioatividade: emissões alfa, beta e gama;
- (v) decaimento radioativo;
- (vi) meia-vida radioativa;
- (vii) fissão nuclear;
- (viii) reação em cadeia;
- (ix) energia nuclear: o reator de fissão e a bomba atômica.

O que se espera

Espera-se o envolvimento do aluno nas discussões, tal que ele tenha condições de questionar e compreender os conteúdos conceituais envolvidos.

Material didático-pedagógico e estratégias

- Texto para discussão em grupo
- Livro didático adotado pela escola
- Livros paradidáticos
- Mapa conceitual
- Vídeos, imagens, experimentos virtuais
- Projetor multimídia

ENCAMINHAMENTO DA ATIVIDADE 3

Ao levarmos em conta o número reduzido de duas aulas semanais de Física no 3º ano, entendemos que o livro didático pode auxiliar na abordagem dos conteúdos, caso o tema seja contemplado na obra; contudo, recomendamos ao professor fazer uso de outras fontes de pesquisa para preparação e complementação dos conteúdos, conforme indicamos nas referências da sequência didática (p. 233). É interessante também disponibilizar um texto a cada grupo de alunos, com apresentação dos itens abordados.

Para o encaminhamento da atividade 3, elaboramos um texto-resumo dos conteúdos conceituais de radioatividade, com algumas sugestões de estratégias e recursos audiovisuais. Privilegiamos a abordagem qualitativa dos conteúdos, conforme sinalização dos docentes envolvidos na pesquisa. Todavia, reiteramos que o Apêndice A apresenta o desenvolvimento do tema de forma mais detalhada. O professor pode usar o recurso do projetor multimídia para apresentar trechos do texto, o mapa conceitual, as imagens, vídeos e simulações.

Ao final de cada item apresentamos algumas questões para reflexão, com o intuito de professor e alunos fazerem generalizações e sínteses dos conteúdos conceituais trabalhados. Sugerimos ainda ao professor complementar a atividade com questões e exercícios extraídos de livros didáticos e paradidáticos, porquanto entendemos que a resolução de **questões diversificadas** permite ao educando aplicar os conteúdos conceituais abordados, de forma a contribuir para a construção de sua aprendizagem.

TEXTO: CONTEÚDOS CONCEITUAIS DE RADIOATIVIDADE

(i) O MODELO ATÔMICO DIDÁTICO

O modelo atômico para fins didáticos é bastante simplificado, apresentando apenas a estrutura básica do átomo. Essencialmente, o átomo é neutro, é constituído de um núcleo bastante pequeno com carga elétrica positiva, onde estão concentradas as partículas subatômicas – *prótons* e *nêutrons*. Ao redor do núcleo está a eletrosfera, formada por uma configuração de partículas denominadas *elétrons*, com cargas elétricas negativas.

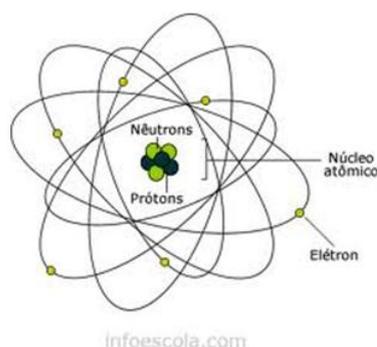


Figura 24: Ilustração do Modelo Atômico Didático.
Fonte: Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.
<http://www.cnen.gov.br/acnen/imagens/atomo.png>.

- Apresentar **VÍDEO 10:** *Vídeo – Experimento de Rutherford* - YouTube.
Duração: 04min08s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=tw1-4TlrcwU>.
(OBS: Sugerimos ao professor comentar os modelos atômicos de Nagaoka, Thomson, Rutherford e Bohr).

O átomo de um elemento químico é caracterizado pelo número de prótons no núcleo, denominado *número atômico Z*; por conseguinte, um elemento químico é definido pelo número de seus prótons. O *número de massa A* é o número de prótons somado ao número de nêutrons no núcleo.

Com o uso do projetor multimídia, sugerimos a apresentação do mapa conceitual, representado a seguir, para a abordagem do modelo atômico bastante simplificado.

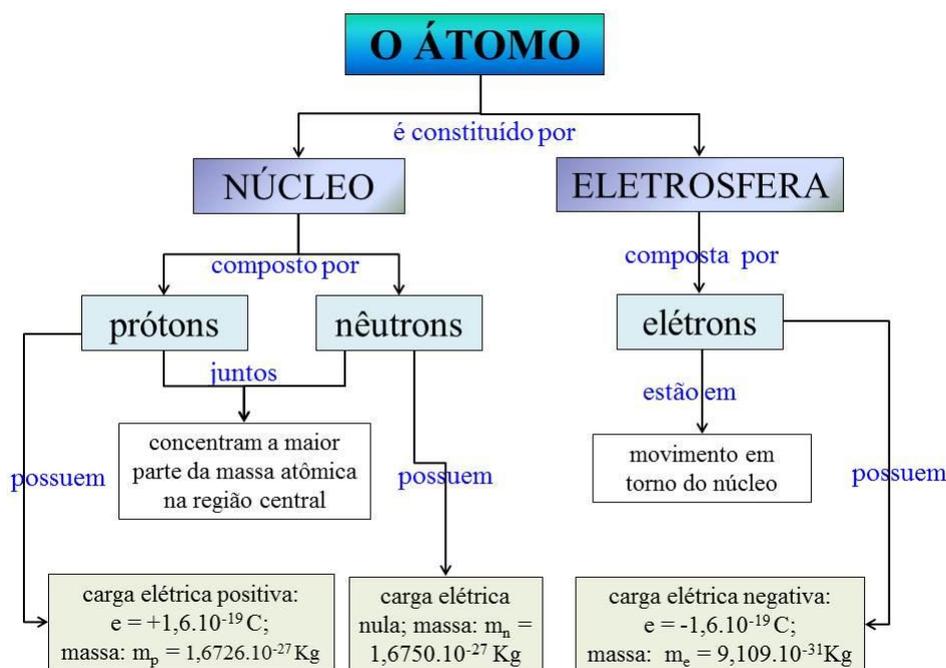


Figura 25: Mapa conceitual para estudo do modelo atômico didático.

- Apresentar **SIMULAÇÃO 1: Monte um Átomo**.

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/build-an-atom.

(OBS: A simulação oferece duas opções muito interessantes: “construir átomo” e “jogo”, para os alunos aprenderem se divertindo. Apresenta ainda recursos que mostram o símbolo do elemento químico, os isótopos, a estabilidade/instabilidade do átomo, a massa atômica e carga elétrica).

ii) O NÚCLEO ATÔMICO

O núcleo atômico é composto por dois tipos de partículas, denominadas *núcleons*: o próton, carregado positivamente, e o nêutron, que não tem carga elétrica.

A maior parte do átomo é espaço vazio. O núcleo é bastante pequeno e concentra a maior parte da massa atômica. Enquanto o diâmetro do átomo é da ordem de 10^{-10} m, o do núcleo tem cerca de 10^{-14} m, isto é, cerca de 10 mil vezes menor do que o átomo.

Sabe-se, contudo, que cargas elétricas sofrem a interação coulombiana, ou seja, cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e cargas elétricas de sinais contrários se atraem. Então, por que o núcleo atômico não se desfaz, logo que os prótons são partículas carregadas com

cargas de mesmo sinal e tendem a se afastar uns dos outros pela ação da força de repulsão elétrica? Essa questão é resolvida por outra força, de ação atrativa, responsável por compensar a força de repulsão coulombiana. A interação forte, ou força nuclear, é que mantém a estabilidade do núcleo. A força nuclear é muito intensa e atrai os *núcleons*, uns em direção aos outros, no interior do núcleo. Como é mais intensa do que a força de repulsão coulombiana, a interação forte mantém os prótons e nêutrons coesos.

Em todos os núcleos encontrados na natureza, as forças nucleares são mais intensas do que as forças coulombianas de repulsão; nos radioisótopos, entretanto, o domínio da força nuclear é tênue. A pequenas distâncias, a força nuclear diminui rapidamente com o aumento da distância entre as partículas nucleares.

Para refletir e discutir

- 1) Recapitulando: Rutherford e colaboradores realizaram importantes experimentos que indicaram o caminho a ser seguido na investigação da estrutura do átomo. O que os pesquisadores concluíram acerca do átomo?
- 2) Quais são os dois diferentes *núcleons* que compõem o núcleo atômico?
- 3) Por que a força elétrica de repulsão entre os prótons de um núcleo atômico não os afasta velozmente uns dos outros? Explique que interação tende a manter juntas as partículas nucleares e que interação tende a afastá-las.

iii) ISÓTOPOS E RADIOISÓTOPOS

Os átomos de um mesmo elemento químico podem ter números diferentes de nêutrons e a consequência imediata é que suas massas são distintas. Assim, os isótopos são os átomos de um mesmo elemento químico que apresentam massas diferentes, em virtude do número diferente de nêutrons. Os isótopos de elementos radioativos são também chamados de radioisótopos.

Para refletir e discutir

- 1) O que os isótopos de um mesmo elemento químico têm em comum? E o que os diferencia?
- 2) O que são os radioisótopos?

(iv) RADIOATIVIDADE: EMISSÕES ALFA, BETA E GAMA

A **radioatividade** é um processo que tem origem no núcleo atômico e que resulta na emissão espontânea de partículas subatômicas energéticas, constituindo-se assim, numa radiação nuclear. Podemos, então, afirmar que a radioatividade é a transmissão de *radiação nuclear*, ou *emissão de energia nuclear*, ou, ainda, definir a radioatividade como *energia nuclear em trânsito*.

O experimento que mais revela o comportamento da radioatividade é aquele em que a radiação de uma amostra de material radioativo passa por um campo elétrico muito intenso, produzido por duas placas eletricamente carregadas. Observa-se que o feixe inicial é dividido em três radiações distintas. A deflexão em direção à placa carregada positivamente indica que o feixe é composto por partículas de natureza negativa, enquanto que a deflexão na direção da placa negativa indica um feixe composto por partículas positivas. O feixe que segue sua trajetória sem desvio não sofre ação do campo elétrico, logo, não tem carga elétrica. Como ainda não se conhecia a natureza dessas radiações no início do século XX, elas foram denominadas *raios alfa*, *raios beta* e *raios gama*, que constituem as três formas de radiação nuclear.

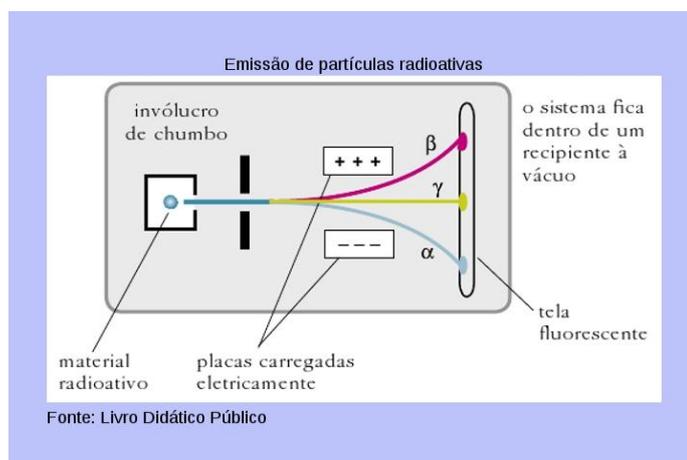


Figura 26: Representação do arranjo experimental para detecção das três radiações nucleares α , β e γ , emitidas por uma amostra de material radioativo. Fonte: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/tvmultimedia/imagens/4quimica/7emissaodepartradio.jpg>.

Após esses estudos, descobriu-se que os raios alfa e beta são partículas providas de carga elétrica e os raios gama são radiações eletromagnéticas (sem carga elétrica). Sabe-se também que essas radiações são ionizantes, uma vez que são capazes de ionizar gases.

Assim, **raio alfa**, ou partícula alfa (α), é um feixe de partículas emitido espontaneamente por núcleos radioativos. É composto por núcleos de hélio, os quais possuem 2 prótons e 2 nêutrons (${}^4_2\text{He}$). É importante observar que toda vez que um núcleo ejeta uma partícula alfa, o número de massa do núcleo resultante diminui quatro unidades ($A - 4$), enquanto que o número atômico diminui duas unidades ($Z - 2$).

Raio beta, ou partícula beta negativa (β^-), ou simplesmente partícula beta (β), é a emissão espontânea de um elétron de origem nuclear, resultante da conversão de um nêutron em um próton. Embora o número de massa (A) do núcleo resultante não seja alterado pela perda do elétron, o número atômico do núcleo resultante aumenta uma unidade ($Z + 1$). Algumas vezes, o núcleo emite uma partícula beta positiva (β^+) denominada *pósitron*, resultante da conversão de um próton em um nêutron; neste caso, o número atômico do núcleo resultante diminui uma unidade ($Z - 1$). O *pósitron* é a antipartícula do elétron - é idêntico ao elétron, com exceção da carga elétrica que é positiva. Assim, a radiação beta é a emissão espontânea de um elétron negativo de origem nuclear ou de um pósitron (elétron positivo), por um núcleo atômico instável.

Raio gama (γ) é a radiação eletromagnética de alta frequência formada por um feixe de fótons (sem carga elétrica), emitida por núcleos de elementos radioativos.

Poder de penetração das radiações nucleares

As partículas alfa são as que têm maior massa (2 prótons e 2 nêutrons) e, em virtude de sua grande massa (quando comparada à massa do elétron, que é tomado como referência), o poder de penetração na matéria é pequeno e não conseguem atravessar mais do que alguns centésimos de milímetro na matéria. Uma lâmina de alumínio com 0,66 mm de espessura ou uma folha de papel já é o suficiente para interceptá-las, inclusive a própria pele humana. O alcance é cerca de 7 cm no ar.

A maior parte das partículas beta são elétrons de origem nuclear. Seu poder de penetração é cerca de 50 e 100 vezes maior do que o das partículas alfa, conseguindo penetrar até 16 mm na madeira. No corpo humano, podem penetrar até 2 cm e causar sérios danos. São

barradas por lâminas de alumínio com 1 centímetro de espessura ou por lâminas de chumbo. O alcance é de alguns metros no ar.

Em virtude da natureza ondulatória e ausência de carga elétrica, os raios gama são muito mais penetrantes do que as partículas alfa e beta. São capazes de atravessar dezenas de metros no ar, até 25 cm na madeira e 15 cm no aço. Podem atravessar completamente o corpo humano e causar sérios danos. É possível barrar a radiação gama por meio de placas de chumbo ou por grossas camadas de concreto ou terra. (PIETROCOLA et al., 2010; SAFFIOTI, 1982).

- Apresentar **VIDEO 11** - *Tipos de radiação: partícula alfa, beta e radiação gama* – YouTube. Duração: 02min9s. Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=N1TMhRKiOBk>.

Para refletir e discutir

- 1) Onde se origina a radioatividade?
- 2) Quais são os tipos de radiação emitidos por núcleos de elementos químicos pesados, com número atômico $Z \geq 83$?
- 3) Recapitulando: como era a montagem experimental de Rutherford e equipe, que permitiu detectar as radiações alfa e beta? Os pesquisadores conseguiram detectar a radiação gama?
- 4) Sabe-se que os raios gama são fundamentalmente diferentes dos raios alfa e beta. Qual é a diferença básica entre essas radiações?
- 5) Por que os raios alfa e beta são desviados por campos elétricos e os raios gama não sofrem qualquer desvio?
- 6) Que alteração ocorre no núcleo atômico quando emite uma partícula alfa? E quando emite uma partícula beta? E o que acontece quando um núcleo emite radiação gama?
- 7) Entre as três formas de radiação nuclear, qual delas é a mais penetrante? E a menos penetrante? Ordene em sequência decrescente.

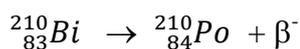
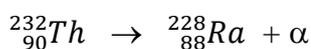
(v) DECAIMENTO RADIOATIVO

A estabilidade nuclear é ditada pelo equilíbrio entre as forças nucleares que agem entre os pares de prótons e nêutrons e a força de repulsão coulombiana entre os prótons; todavia, à medida que o número atômico Z cresce, o número de nêutrons torna-se maior do que o de prótons para manter o núcleo coeso. Isso ocorre porque a força coulombiana de repulsão entre prótons vai aumentando de intensidade, podendo causar o rompimento do núcleo. Desse modo, são necessários mais nêutrons, pois estes experimentam somente a força nuclear atrativa. Como o número atômico Z vai aumentando, o núcleo se torna instável (lembrar a simulação “monte um átomo”, em que é possível variar o número atômico).

Os elementos radioativos são aqueles que possuem núcleos instáveis, em virtude do excesso de partículas ou de carga elétrica. Tais núcleos são altamente energéticos e tendem a se estabilizar emitindo espontaneamente partículas e energia. Ao emitirem partículas alfa ou beta, varia o número de prótons no núcleo (diminui ou aumenta), ocorrendo uma alteração do número atômico. Com isso, o elemento químico se transforma, ou se transmuta, e um novo elemento químico é formado. O núcleo original não existe mais. A transformação do núcleo atômico de determinado elemento químico em um núcleo atômico de outro elemento, em virtude da emissão espontânea de partículas nucleares, é conhecida como *decaimento radioativo* ou *transmutação nuclear*.

Após a emissão das partículas alfa (α) e beta (β), o núcleo resultante que ainda permanece com excesso de energia procura se estabilizar e emite um fóton, ou seja, a radiação gama (γ). Neste caso, o núcleo não sofre transmutação, uma vez que não houve emissão de partículas (CARDOSO et al., 200-).

Apresentamos, como exemplos, a equação de transmutação do tório-232 em rádio-228 ao emitir uma partícula alfa (α) e a do bismuto-210 em polônio-210 ao emitir uma partícula beta negativa (β^-):



- Apresentar **SIMULAÇÃO 2: Decaimento Alfa**.

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay.

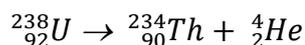
(OBS: Escolher a opção “único átomo”. Relacionar a legenda com o núcleo da simulação, antes e depois da emissão da partícula alfa. Observar o gráfico que relaciona o tempo de decaimento, em milissegundo, com a meia-vida radioativa. Depois, escolher a opção “vários átomos”. OBS: É necessária a instalação do JAVA)

- Apresentar **SIMULAÇÃO 3: Decaimento Beta**.

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/beta-decay.

(OBS: Seguir as orientações apresentadas na simulação 2).

A Teoria das Transformações Radioativas foi apresentada por Ernest Rutherford e Frederic Soddy entre 1902 e 1903. Para entendermos melhor o decaimento radioativo, consideremos o urânio-238, cujo núcleo possui 92 prótons e 146 nêutrons (${}^{238}_{92}\text{U}$). Quando uma partícula alfa (núcleo do átomo de ${}^4_2\text{He}$) é emitida, o núcleo de urânio-238 perde dois prótons e dois nêutrons. Como um elemento químico é identificado pelo número de prótons no núcleo (número atômico Z), os 90 prótons e os 144 nêutrons que restaram não constituem mais o urânio-238. Ocorreu, então, a transmutação nuclear e o átomo de urânio-238 não existe mais, surgindo assim, um novo elemento químico, o tório-234 (${}^{234}_{90}\text{Th}$). Tal decaimento pode ser representado pela seguinte equação:



Costuma-se denominar *núcleo pai* aquele que decai (o urânio-238, por exemplo) e *núcleo filho* o produto do decaimento (o tório-234). Na equação demonstrada, os números de massa dos produtos obtidos ($234+4$) e os números atômicos ($90+2$) se equilibram. Durante a transmutação, a energia é liberada de três formas: parcialmente como energia cinética da partícula alfa (${}^4_2\text{He}$) e como energia cinética do núcleo de tório-234, e parcialmente na forma de radiação gama. O tório obtido desse decaimento também é radioativo e sofre transmutação, produzindo outro elemento químico e liberando energia. (HEWITT, 2011).

Todos os elementos químicos naturais ou artificiais, com número atômico $Z \geq 83$, são radioativos naturalmente e se desintegram sucessivamente passando de um núcleo a outro, até se transformarem em um isótopo estável de chumbo (Pb), com número atômico $Z = 82$, que é o final da radiação natural (Cf. **Anexo A**).

Para refletir e discutir

- 1) Por que um núcleo com número atômico maior é normalmente menos estável do que um núcleo com número atômico menor?

- 2) O que é decaimento radioativo ou transmutação nuclear? É um processo natural?
- 3) Na equação do decaimento do tório-232 (núcleo pai), demonstrada acima, por que o núcleo resultante de rádio-228 (núcleo filho) ficou com número atômico $Z = 88$? E na transmutação do bismuto-210 (núcleo pai), por que o núcleo resultante de polônio-210 (núcleo filho) ficou com número atômico $Z = 84$, maior do que o do núcleo pai?
- 4) O rádio-228 e o polônio-210, produtos resultantes dos decaimentos demonstrados nas equações acima, também sofrem decaimento? Justifique.
- 5) Se o plutônio-239 emitir uma partícula alfa, qual será o número atômico do núcleo resultante?
- 6) O urânio existente em todo o planeta está sofrendo decaimento radioativo a longo prazo. Qual é o destino final de todo urânio?

(vi) MEIA-VIDA RADIOATIVA

Denomina-se *atividade* de uma amostra radioativa o número de decaimentos por unidade de tempo. Assim, a *meia-vida* ($T_{1/2}$) é a medida do tempo necessário para que a atividade de metade dos átomos de uma amostra radioativa sofra decaimento.

O decaimento de uma amostra radioativa ocorre, matematicamente, de forma exponencial, de acordo com a Lei do Decaimento Radioativo, dada pela seguinte equação:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

em que:

N é o número de átomos presentes no instante t ; N_0 é o número de átomos no início da contagem ($t = 0$) da atividade de uma amostra; λ é a constante de decaimento dada por $\lambda = 1/T$, onde T é a meia-vida do elemento radioativo.

O gráfico da figura 27 mostra a curva de um decaimento radioativo. Note que $N_0/2$ corresponde à metade dos átomos de uma amostra após o decaimento radioativo durante o tempo de uma meia-vida T .

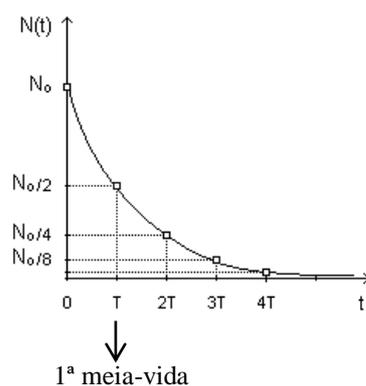


Figura 27: Curva representativa de decaimento radioativo.

Podemos ainda representar o processo de decaimento de uma amostra radioativa por meio da seguinte expressão matemática:

$$M = M_0/2^x$$

em que:

M é a massa final da amostra; M_0 é a massa no início da contagem do tempo ($t = 0$) da atividade da amostra e x é o número de meias-vidas contado em um período especificado.

Por exemplo, se tomarmos 100 gramas de uma amostra radioativa, após um intervalo de tempo de uma meia-vida ($x = 1$) apenas 50 gramas do material continuarão a emitir radiação. Passado um período de duas meias-vidas ($x = 2$), 25 gramas da amostra continuarão a emitir radiação e, assim, sucessivamente, até atingir uma configuração de equilíbrio.

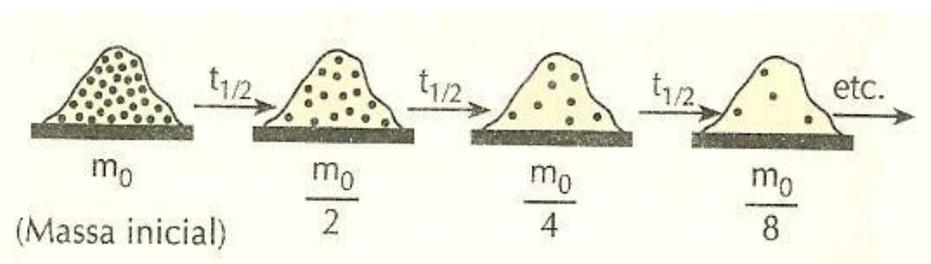


Figura 28: Representação da massa de uma amostra radioativa em função do tempo de meia-vida. Fonte: Química sem Segredos. <http://quimicasemsegredos.com/images/Teoria/radio/radio8.jpg>.

A tabela 2 apresenta a meia-vida de alguns radioisótopos muito usados em medicina:

Tabela 2: Meia-vida de alguns radioisótopos usados em medicina.

Césio-137 (^{137}Cs)	30 anos
Estrôncio-90 (^{90}Sr)	28,2 anos
Cobalto-60 (^{60}Co)	5,26 anos
Írídio-192 (^{192}Ir)	73,8 dias
Iodo-131 (^{131}I)	8 dias
Iodo-123 (^{123}I)	8 dias
Ouro-198 (^{198}Au)	2,7 dias
Tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	6 horas

Fonte: OKUNO; YOSHIMURA (2010, p.256).

Para refletir e discutir

- 1) O acidente radioativo de Goiânia com o césio-137, ocorrido em 1987, foi um grave episódio que provocou a contaminação de centenas de pessoas. Sabe-se que a meia-vida desse elemento químico é de 30 anos. Quanto restará de uma amostra original de 80 gramas de Cs-137 ao final de 30 anos? E ao final de 90 anos? E após 120 anos?
- 2) Os radioisótopos utilizados nos exames diagnósticos e no tratamento de doenças são chamados de radiofármacos. Por que é importante o bom planejamento na utilização desses medicamentos pelos hospitais e clínicas médicas?
- 3) O iodo-131, utilizado no tratamento da tireoide, tem meia-vida de 8 dias. Quanto tempo levará para que uma amostra decaia para $\frac{1}{4}$ da quantidade original?
- 4) A tomografia por emissão de pósitrons, mais conhecida pela sigla PET (Positron Emission Tomography), é um aparelho para exame de diagnóstico por imagem. Suponha que um laboratório produza, às 8 horas da manhã, 1 miligrama de flúor-18, cuja meia-vida é de 1,8 horas, para que seja utilizado pela PET às 17 horas. Quanto restará de flúor-18 a essa hora da tarde?

(vii) FISSÃO NUCLEAR

Fissão nuclear é o processo pelo qual o núcleo atômico de um átomo pesado se divide em dois núcleos menores, com liberação de muita energia. Na natureza, raramente a fissão nuclear ocorre de forma espontânea. A reação nuclear é provocada bombardeando-se o núcleo alvo com partículas subatômicas (geralmente, o nêutron). Após capturar a partícula subatômica, o núcleo alvo se torna altamente instável e se “quebra” em dois núcleos menores, emitindo grande quantidade de energia.

- Apresentar **VÍDEO 12: Fissão nuclear, nuclear fission** – YouTube.
Duração: 01min35s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=ehL4HoyRqdw>.

No exemplo típico da fissão do urânio-235, a energia que mantém o núcleo unido é liberada, na maior parte, em forma de calor. Além dos dois núcleos menores que se formam, há a liberação de 2 ou 3 nêutrons. Na quebra do urânio-235 representada abaixo, são liberados 1 núcleo de criptônio-91, 1 núcleo de bário-142, 3 nêutrons, calor e radiação:

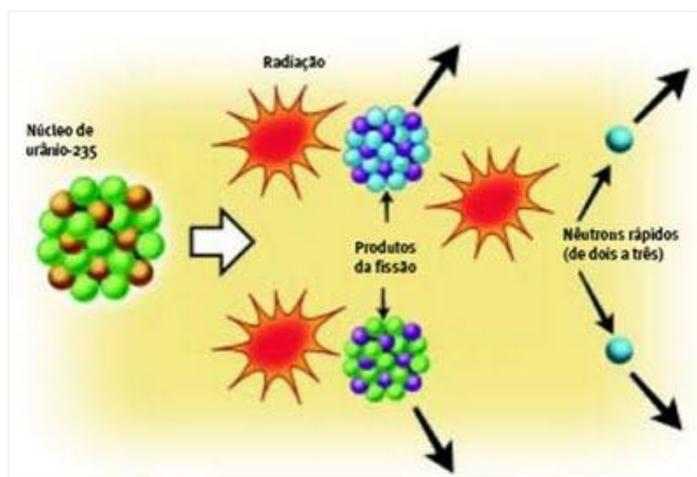
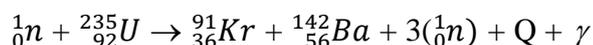


Figura 29: Ilustração da fissão do urânio-235.

Fonte: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf.

Em um processo de fissão, a massa dos fragmentos produzidos mais a dos nêutrons ejetados é menor do que a massa do núcleo original fissionado. A pequena diferença de massa²⁸ que falta é convertida em grande quantidade de energia durante a reação, obedecendo à famosa equação de Einstein: $E = mc^2$. A energia liberada na fissão encontra-se principalmente na forma de energia cinética dos núcleos menores produzidos no processo, os quais se afastam uns dos outros e dos nêutrons ejetados a altas velocidades, além de radiação gama. Assim, a fissão nuclear é um processo de liberação de energia (HEWITT, 2011).

- Apresentar **SIMULAÇÃO 4: Fissão Nuclear**.

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission.

(OBS: Escolher a opção “fissão: um núcleo, reiniciar núcleo” e disparar o canhão de nêutrons).

Para refletir e discutir

- 1) O processo de fissão nuclear é mais facilmente realizável em núcleos leves ou em núcleos pesados?
- 2) O que perturba a estabilidade de um radioisótopo, de forma a dar início ao processo de fissão nuclear?
- 3) A fissão nuclear é um processo natural? O que acontece quando um núcleo pesado sofre fissão?
- 4) Os núcleos resultantes da fissão nuclear do urânio-235, o criptônio-91 e o bário-142 sofrem decaimento radioativo?
- 5) A soma das massas dos fragmentos de fissão é igual à massa do núcleo fissionado? O que você sabe a esse respeito?

(viii) REAÇÃO EM CADEIA

A reação em cadeia é uma sequência de fissões autossustentadas com grande liberação de calor, em que os produtos de uma fissão estimulam fissões adicionais. Como os nêutrons não têm carga elétrica, aqueles liberados na fissão do primeiro núcleo não são repelidos pelos

²⁸ Em reações de fissão, a quantidade de matéria convertida em energia é cerca de 0,1% (HEWITT, 2011).

núcleos vizinhos. Os nêutrons ejetados incidem, então, em outros núcleos da amostra, causando a fissão de outros átomos e liberando mais nêutrons. Desse modo, a fissão é iniciada e sustentada por nêutrons. Essa sequência de fissões autossustentadas é conhecida como *reação em cadeia*. (HEWITT, 2011).

No processo de fissão típico do urânio-235, são ejetados 2 ou 3 nêutrons. Se houver um grande número de núcleos de urânio-235 na região do entorno, a probabilidade de ocorrerem novas fissões será alta. Assim, esses novos nêutrons causam a fissão de 2 ou 3 átomos, liberando mais energia, mais quatro ou nove nêutrons adicionais. Desse modo, ocorre uma sucessão de fissões com grande liberação de calor, radiação gama e radioisótopos.

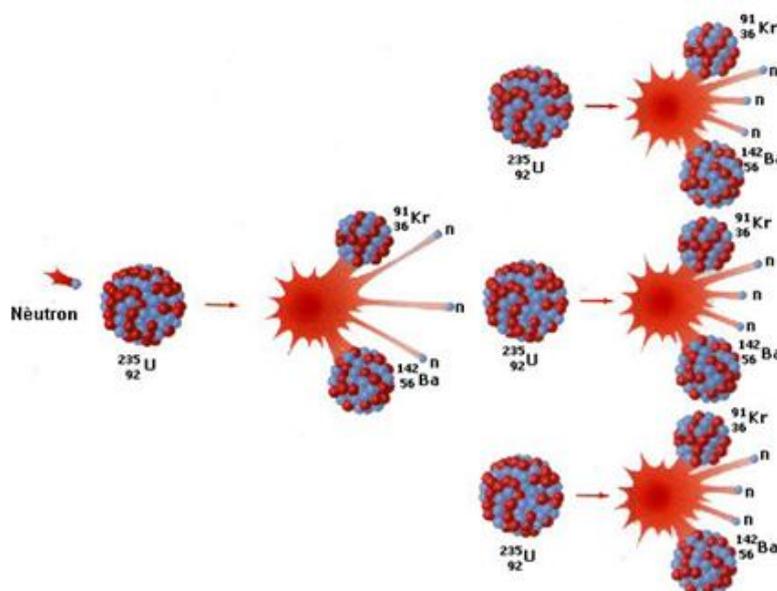


Figura 30: Ilustração da reação em cadeia do urânio-235.

Fonte: <http://www.mundoeducacao.com.br/upload/conteudo/imagens/fissao-nuclear.jpg>.

- Apresentar **VIDEO 13:** *Reação em cadeia* – YouTube. Duração: 25 s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=S6vj-Qk2tBk>.

- Apresentar **SIMULAÇÃO 5:** *Fissão Nuclear*.

(OBS: Escolher a opção “reação em cadeia”, o número de núcleos da coluna de “controles” e, com o *mouse*, direcionar o canhão de nêutrons. Observar quantos núcleos sofrem fissão durante a reação em cadeia. Há ainda a opção de simulação com o uso do “vaso contentor”).

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission.

A reação em cadeia não ocorre naturalmente nas rochas em que a mina de urânio está incrustada, isto porque o urânio existente na natureza é impuro demais para sofrer espontaneamente as reações (HEWITT, 2011).

Para refletir e discutir

- 1) Por que os nêutrons são as partículas mais usadas como projéteis no processo de bombardeio nuclear?
- 2) O que dá início a uma reação em cadeia?

ix) ENERGIA NUCLEAR: O REATOR DE FISSÃO E A BOMBA ATÔMICA

Tanto a bomba atômica quanto um reator de fissão operam segundo o mesmo princípio: a reação em cadeia de núcleos físséis, com grande liberação de calor; no entanto, esses dispositivos se diferenciam na forma como se procede a reação.

O urânio natural - o elemento químico mais “pesado” - é constituído de uma mistura de três radioisótopos: o urânio-234, em quantidade desprezível em relação ao urânio natural; o urânio-235, em quantidade igual a 0,7% em relação ao urânio natural, e o urânio-238, cuja quantidade corresponde a 99,3% de uma amostra de urânio natural. A fissão ocorre principalmente com o isótopo de urânio-235, enquanto que o urânio-238, o mais abundante, não sofre fissão. Para que ocorra a fissão, é necessário que haja uma quantidade mínima de material físsil, chamada de *massa crítica*, para sustentar a reação em cadeia. Desse modo, torna-se necessário elevar a quantidade de urânio-235 encontrado na natureza, procedimento este conhecido como *enriquecimento do urânio*.

É possível controlar a taxa de fissão nuclear. Os **reatores de fissão** empregados nas usinas atômicas produzem a reação em cadeia autossustentada, uma vez que a taxa de reação é controlada. Neste caso, usa-se um material *moderador* constituído por núcleos leves (geralmente água, água pesada ou grafite), permitindo que o reator trabalhe somente com o fluxo de nêutrons necessário para manter a taxa de reação constante. As barras de controle têm a função de absorver os nêutrons excedentes de circulação. Assim, uma vez iniciada e continuada a reação em cadeia, estabelece-se um equilíbrio, mantendo-se a taxa de reação

desejada. Esses reatores de potência usam como combustível principalmente o urânio-238, enriquecido com cerca de 2% a 4% de urânio-235.

- Apresentar **VÍDEO 14:** *Ciclo do urânio (versão em libras)* – YouTube.

Duração: 06min08s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=1wWFstfkncA>.

Um reator em funcionamento pode ser desligado e, assim, interromper a sequência de fissões nucleares; entretanto, o decaimento radioativo dos núcleos resultantes das fissões continua, visto que é um processo espontâneo e não controlado pelo homem, até que se transformem em isótopos estáveis de chumbo.

- Apresentar **SIMULAÇÃO 6:** *Fissão Nuclear*.

(Escolher a opção “reator nuclear”, com o *mouse* baixar o controlador, disparar nêutrons. Variar a altura do controlador e observar o que acontece. Observar também os gráficos de energia).

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission.

A **bomba atômica** é um artefato que produz uma reação em cadeia de forma incontrolável. Uma vez iniciado o processo de fissão, o sistema pode explodir em frações de segundo. No caso de uma bomba atômica, a massa físsil deve ser maior do que a massa crítica para sustentar a reação em cadeia explosiva. Um quilograma de urânio-235 ou de plutônio-239 já possui massa crítica o suficiente para iniciar o processo de fissão explosivo.

- Apresentar **VÍDEO 15:** *Nagasaki Hiroshima new released movie* – YouTube.

Duração: 04min38s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=4BtmT47GbTg>.

Para refletir e discutir

- 1) Que princípio da Física norteia o funcionamento de um reator de fissão de uma usina nuclear e da bomba atômica?

- 2) Que forma de reação em cadeia é produzida em um reator nuclear? E em uma bomba atômica?
- 3) Um reator em funcionamento pode ser desligado, de forma a interromper o a sequência de fissões nucleares? E o que acontece com os núcleos resultantes das fissões, caso o reator nuclear seja desligado?
- 4) Você sabe dizer como a energia nuclear foi apresentada ao mundo?
- 5) Você sabe que combustíveis nucleares foram usados nas bombas atômicas lançadas nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, no final da Segunda Guerra Mundial?

6.5. ATIVIDADE 4

RADIAÇÕES NUCLEARES: EFEITOS, RISCOS E BENEFÍCIOS. APLICAÇÕES NA MEDICINA, INDÚSTRIA, AGRICULTURA, PESQUISA E AMBIENTE

As atividades 4 e 5 envolvem os educandos na apresentação de pesquisas em grupo, cujos temas foram sugeridos ao final da atividade 1. O intuito é proporcionar a autonomia do aluno, a cooperação entre as equipes e o debate produtivo em sala de aula. Os temas que propomos para pesquisa dizem respeito às aplicações da radioatividade em diversas áreas e a eventos relevantes de repercussão mundial.

Historicamente, a energia nuclear tem conotação negativa por causa das bombas atômicas lançadas no final da Segunda Guerra Mundial. Os efeitos nocivos na população japonesa que vivia em Hiroshima e Nagasaki foram devastadores, porém, associar a radiação nuclear à destruição é um erro.

A energia nuclear faz parte de nosso cotidiano, visto que além do uso para a geração de energia elétrica, tem importantes aplicações na área da saúde, na indústria, agricultura, pesquisa e ambiente. Propomos então a atividade 4, para que os alunos apresentem suas pesquisas e discutam sobre as aplicações da radioatividade nos diversos campos, avaliando os seus efeitos, riscos e benefícios.

Papel do professor

O papel do professor é o de conduzir o debate entre os grupos de alunos, incentivar a todos a expor suas ideias, hipóteses e soluções a respeito dos riscos e benefícios do uso da radiação nuclear. Durante as discussões, é fundamental identificar os conteúdos conceituais envolvidos, a fim de se alcançarem os objetivos educacionais. Ao final do debate entre os grupos, vale refletir sobre a seguinte questão: é possível abrir mão da energia nuclear?

Temas das pesquisas para apresentação dos trabalhos em grupo:

Tema 1: Funcionamento básico de um reator e de uma usina nuclear.

Tema 2: Rejeitos radioativos e a sua destinação.

Tema 3: Aplicações da energia nuclear na medicina.

Tema 4: Aplicações da energia nuclear na indústria.

Tema 5: Aplicações da energia nuclear na agricultura.

Tema 6: Datação por carbono-14.

6.6. ATIVIDADE 5

AS BOMBAS ATÔMICAS E OS ACIDENTES NUCLEARES E RADIOATIVOS

A atividade 5 tem o intuito de despertar no estudante uma atitude crítica com relação ao mundo a sua volta e prepará-lo para o exercício da cidadania, de forma que seja capaz de emitir juízos de valor diante de questões em que a Ciência e a tecnologia envolvem riscos para as pessoas e o meio ambiente.

Para tanto, entendemos que temas como as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki e os acidentes nucleares e radioativos de grande repercussão mundial estimulem o debate, de modo a contribuir para a formação de um aluno participativo da sociedade em que vive, com responsabilidades sociais e éticas.

Papel do professor

O papel do professor é promover as discussões entre os alunos durante a apresentação dos trabalhos. Questões como os riscos e os efeitos da utilização da energia nuclear para fins bélicos, a responsabilidade das autoridades e dos cientistas na utilização de tal forma de energia, e a continuidade ou não da exploração nuclear são fundamentais nas discussões entre os grupos de alunos.

Temas das pesquisas para apresentação dos trabalhos em grupo:

Tema 7: O Projeto Manhattan.

Tema 8: As Bombas Atômicas de Hiroshima e Nagasaki.

Tema 9: O acidente nuclear de Chernobyl, Ucrânia (1986).

Tema 10: O acidente radioativo de Goiânia, Brasil (1987).

Tema 11: O acidente nuclear de Three Mile Island, EUA (1979).

6.7. ATIVIDADE 6

RETORNO AO PROBLEMA SOCIAL ORIGINAL: CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DO ACIDENTE RADIOATIVO DE FUKUSHIMA E AS PERSPECTIVAS DO USO DA ENERGIA NUCLEAR PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

A retomada das discussões a respeito do acidente radioativo de Fukushima Daiichi permite ao aluno rediscutir os conceitos físicos fundamentais envolvidos no evento, como, também, entender e avaliar com maior profundidade as consequências danosas do despejo de radiação nuclear na população japonesa.

A ideia é apresentar novamente os vídeos da atividade 1, especialmente os vídeos 3, 4 e 5, para que os alunos analisem, sob novo olhar, a sucessão de acontecimentos que culminaram no acidente radioativo. É importante rediscutir os problemas ocorridos nos reatores nucleares, como a radiação escapou para o meio ambiente, quais foram os elementos radioativos lançados na atmosfera e, sobretudo, analisar os conceitos físicos envolvidos com base nos conhecimentos adquiridos. Ao mesmo tempo, o debate busca contribuir para que o aluno pense criticamente sobre a sua responsabilidade social e ética na tomada de decisões na sociedade em que vive.

Em suma, procuramos elaborar o conjunto de atividades da proposta metodológica de forma a mostrar *por que* ensinar radioatividade no Ensino Médio, *o que* ensinar e *como* o professor pode trabalhar os conteúdos conceituais em sala de aula. Para isso, pesquisamos diversos materiais didático-pedagógicos acessíveis, como vídeos, experimentos virtuais, artigos e livros na área de ensino de Ciências. A seleção das simulações e dos vídeos sugeridos no desenvolvimento das atividades despendeu longas horas de pesquisa, visto que procuramos recursos com informações corretas e com duração de poucos minutos. Julgamos também importante destacar as referências que foram utilizadas em cada atividade da sequência didática, acrescidas de sugestões para as pesquisas em grupo (Cf. Referências da sequência didática, p. 233).

É importante salientar que a sequência didática aqui apresentada não é uma receita a ser seguida, e sim, uma proposta de ensino de radioatividade, que pode ser ampliada. Com este trabalho, esperamos dar subsídios ao professor do Ensino Médio, como, também, contribuir para o ensino da Física.

A efetiva inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no currículo do Ensino Médio ainda caminha a passos muito lentos. Em nossa pesquisa, constatamos que são vários os entraves que dificultam a abordagem dos conteúdos em sala de aula, entre eles, a escassez de propostas e a dificuldade na elaboração de atividades. Por essa razão, propostas de trabalho e sugestões de atividades direcionaram a nossa investigação, uma vez que são esses os motivos mais evidentes a se contrapor à implementação dos conteúdos de FMC em sala de aula.

O foco de nossa pesquisa foi a construção de uma proposta de ensino que contribuísse para a introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Sustentamos que atividades de ensino com enfoque na História e Filosofia da Ciência (HFC) e no movimento Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) podem contribuir para a efetiva inserção dos conteúdos conceituais e com a renovação do ensino de Física no Nível Médio. Tivemos a preocupação de elaborar uma sequência didática para o ensino da radioatividade no Nível Médio, sobretudo, com a maneira como as atividades podem ser ordenadas e articuladas.

Pesquisas recentes (FUSINATO, 2009; PEREIRA; FUSINATO, 2013) mostram que a maioria dos docentes que ministra Física no Ensino Médio não possui formação específica em Física, apresentando deficiências na abordagem da Física Clássica e, em se tratando da Física Moderna e Contemporânea, a dificuldade tende a aumentar muito mais, devido à complexidade dos conceitos físicos presentes. Por isso, acreditamos que a proposta de ensinar radioatividade no Nível Médio por meio de uma sequência didática fornecerá ao professor e ao aprendiz condições de como trabalhar o conteúdo em questão, promovendo entre as partes maior interação e apropriação dos conceitos físicos em FMC.

Para a construção da proposta, levamos em consideração dois pontos que julgamos importantes: o papel que o livro didático desempenha na ação do professor em sala de aula e o que os professores pensam e vivenciam a respeito do ensino do tema no Nível Médio. A Análise de Conteúdo, de Bardin (1977), auxiliou-nos na análise dos resultados obtidos na pesquisa.

Sabe-se que os conteúdos propostos pelos autores das obras didáticas tendem a estabelecer uma rotina na prática do professor. A forma como as atividades e exercícios são apresentados permite tanto ao professor quanto aos alunos desenvolverem o trabalho em sala

de aula de forma objetiva, contudo, contribui para a acomodação na ação do professor. Nesse sentido, entendemos que a análise que realizamos das dez obras de Física, selecionadas pelo Plano Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLD), ano 2012, foi relevante.

O levantamento preliminar dos livros didáticos permitiu que verificássemos se o tema “radioatividade” é abordado ou não pelos autores. Constatamos que entre as dez obras de Física do PNLD/2012, sete contemplam o tema (quadro 3). Analisamos então, nas sete obras, a forma de apresentação dos conteúdos conceituais, como, também, se os autores atendem as orientações dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) para o Ensino Médio. Verificamos quais conteúdos são contemplados nas obras, o enfoque dado pelos autores – se CTS, HFC ou Ciência pura - e a forma de abordagem das atividades e exercícios propostos – se qualitativa ou formal.

Dentre as sete obras que contemplam o tema, cinco apresentam algumas lacunas na abordagem dos conteúdos escolares (quadro 5), o que pode dificultar, em nossa avaliação, o ensino e a aprendizagem dos conteúdos de radioatividade de forma plena. Duas obras se destacaram – *Física em Contextos: Pessoal, Social, Histórico*, de Pietrocola et al., e *Quanta Física*, de Kantor, Menezes et al. –, uma vez que apresentam os conteúdos conceituais de forma completa, detalhada e contextualizada, em conformidade com os PCNs e com a obra de Okuno e Yoshimura (2010), tomada como parâmetro de comparação.

Constatamos, todavia, que o livro didático de Pietrocola et al. foi adotado por apenas uma escola do Núcleo Regional de Educação de Maringá e o de Kantor, Menezes et al., por nenhuma. Os motivos que levaram as escolas a optar por outros livros podem ser diversos e expomos algumas conjecturas. O livro didático é escolhido pelo conjunto de professores que ministra a disciplina na escola, após análise das coleções do PNLD enviadas pelas editoras. Assim, consideramos que os docentes podem ter levado em conta a pouca disponibilidade de tempo, visto que ambas as obras mencionadas requerem leitura cuidadosa dos conteúdos conceituais e dos textos apresentados, além de um bom planejamento para o desenvolvimento das atividades propostas. Ademais, suspeitamos que o conteúdo do livro didático de Pietrocola et al., cujos volumes possuem entre 400 e 528 páginas, pode ter sido considerado muito extenso pelos professores de Física ao levarem em conta a carga horária de duas horas/aula semanais. Com relação à obra de Kantor, Menezes et al., a forma de apresentação dos conteúdos, que difere da tradicional dos livros didáticos, talvez tenha contribuído para a rejeição à obra por parte de docentes, acostumados com a rotina imposta pelos manuais escolares.

Quanto ao enfoque dado pelos autores na apresentação dos conteúdos escolares (quadro 4), notamos que *Física em Contextos: Pessoal-Social-Histórico*, *Física para o Ensino Médio* e *Quanta Física* apresentam um equilíbrio entre os enfoques CTS, HFC e Ciência pura. Os autores de duas obras, *Física Aula por Aula* e *Física e Realidade*, privilegiam unicamente a abordagem CTS. Os autores de *Física: Ciência e Tecnologia* apresentam os conteúdos com ênfase na CTS e Ciência pura, enquanto que a obra *Compreendendo a Física* enfoca as perspectivas Ciência pura e HFC. Em resumo, notamos que o enfoque CTS destaca-se em seis das sete obras, Ciência pura em cinco e o enfoque na HFC em quatro obras.

Já na análise relativa à ênfase dada pelos autores na apresentação das atividades e exercícios (quadro 6), observamos que prevalece a Ciência pura em todas as sete obras, com larga diferença sobre o enfoque CTS e diferença mais acentuada sobre o HFC em seis obras. Quanto à forma de abordagem (qualitativa ou formal), a análise evidenciou que prevalece a abordagem qualitativa em quatro das sete obras e, em apenas uma delas, há um equilíbrio entre as duas formas. Embora a perspectiva CTS destaque-se na apresentação dos conteúdos em seis obras e a HFC em quatro, constatamos que os autores não privilegiam tais enfoques nas atividades e exercícios propostos.

Entendemos que é fundamental o professor utilizar um livro de qualidade que atenda amplamente aos objetivos educacionais, visto que o livro didático exerce uma influência significativa no trabalho de professores da escola básica (CUSTÓDIO; PIETROCOLA, 2004; DANHONI NEVES; RESQUETTI, 2006; GASPAR, 2003; MEGID NETO; FRACALANZA, 2003; RESQUETTI; DANHONI NEVES, 2007; SILVA, 1998). Entendemos, todavia, que tal material escolar não pode ser visto como o único ou principal recurso para o ensino-aprendizagem dos conteúdos conceituais, tampouco ditar o currículo, definir metodologias ou organizar o cotidiano em sala de aula. Em nossa avaliação, o livro didático é um recurso que vem auxiliar o trabalho do professor e contribui para a adequação dos conteúdos escolares, mas é o professor quem deve traçar os caminhos em sala de aula.

A análise dos livros didáticos auxiliou-nos na elaboração da atividade dedicada aos conteúdos conceituais e foi esta a parte mais trabalhosa: adequar os conteúdos científicos para o Ensino Médio. Procuramos selecionar os conteúdos de forma a preencher as lacunas identificadas nas obras e proporcionar ao aluno do Ensino Médio a compreensão dos conceitos fundamentais de radioatividade. Buscamos apresentá-los de forma didática, compatível com as intenções educacionais, de modo a familiarizar os estudantes com as teorias, leis e conceitos físicos básicos e, também, aqueles professores que não tiveram

oportunidade de conhecer o assunto em sua formação inicial. Acreditamos que por meio da aprendizagem dos conteúdos escolares, os estudantes serão capazes de compreender as aplicações tecnológicas da radioatividade nos diversos campos da atividade humana, avaliar os riscos e benefícios, emitir opiniões e tomar decisões quando os aspectos científicos envolverem situações sociais e éticas.

A pesquisa com os professores de Física do Ensino Médio foi fundamental para a construção da proposta. Os dez docentes que participaram do estudo atuavam na rede pública de ensino do estado do Paraná e pertenciam a seis Núcleos Regionais de Educação (NRE) diferentes. Entre eles, oito estavam cursando o Programa de Desenvolvimento Educacional (PDE) e dois faziam parte do Grupo de Trabalho em Formação Inicial e Continuada em Física (GTFIC), da Universidade Estadual de Maringá. A pesquisa foi desenvolvida em dois momentos: a aplicação de um questionário e a apresentação da proposta para avaliação dos professores.

O questionário foi elaborado com base no levantamento realizado no capítulo 1º, que aponta os obstáculos para a introdução da FMC no Ensino Médio, e nas orientações de Moreira (2010). As respostas dos docentes forneceram-nos dados informativos sobre o que eles pensam e vivenciam com relação à inserção da FMC em sala de aula e, mais especificamente, com relação ao tópico *radioatividade*. O levantamento das principais dificuldades apontadas pelos professores para o ensino e aprendizagem de FMC no Nível Médio (quadro 8) corroborou o levantamento apresentado no capítulo 1º. A carga horária de apenas duas aulas semanais de Física em cada série, a carência de cursos de formação continuada na área de FMC, o pouco tempo disponível para pesquisa e preparação de aulas de FMC, a adequação dos conteúdos para o Ensino Médio e a não oportunidade de conhecer o assunto radioatividade na graduação foram os maiores entraves apontados pelos professores.

Ao considerarem a possibilidade de abordar o tópico *radioatividade* em suas aulas, a maioria dos professores opinou pela forma de abordagem qualitativa dos conteúdos. Elaborarmos, então, as atividades da sequência didática conforme sinalização dos professores, porém, com possibilidade de introdução de questões formais.

Com relação às orientações dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), os professores, em sua maioria, concordaram com um ensino de Física com enfoque na História e Filosofia da Ciência (HFC) e nas relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Observamos que um professor privilegia o enfoque CTS, embora considere importante a abordagem na perspectiva da HFC. Outro professor referiu-se ao enfoque HFC, mas não

emitiu opinião com relação ao CTS. Desse modo, deduzimos que oito entre os dez professores consideram relevante a abordagem dos conteúdos conceituais de radioatividade com enfoque na evolução histórica da Ciência, associado às relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade.

Concluimos que todos os dez professores do grupo entrevistado gostariam de pôr em prática a proposta de ensino de radioatividade, aqui apresentada, a seus alunos do Ensino Médio. Dois professores, entretanto, argumentaram que, para ministrarem a sequência didática, há a necessidade de uma preparação preliminar por meio de um curso de formação continuada, de forma que possam adquirir o conhecimento adequado para a abordagem do tema. Outros dois professores ressaltaram que a proposta de ensino é pertinente, uma vez que não conhecem estratégias e metodologias de como trabalhar o tema em sala de aula. Percebemos, ainda, nas respostas de três entrevistados, o descontentamento com a carga horária reduzida de Física, que pode comprometer a aplicação da proposta. Este ponto é o principal obstáculo apontado pelo grupo para a inserção da FMC no Ensino Médio.

A carga horária de apenas duas aulas semanais de Física, em cada série do Ensino Médio, realmente é um problema com o qual o professor tem muita dificuldade de lidar. Para os docentes, todos os conteúdos de Física Clássica são fundamentais e deixar de abordar qualquer um dos tópicos, que são tradicionalmente apresentados nos livros didáticos, é como “abandonar um filho”, usando as palavras de Anna Maria Pessoa de Carvalho (2012) para este contexto.

Conforme expomos no capítulo 1º, suspeitamos que as dificuldades que o professor encontra em sua prática diária sejam decorrentes de um fator principal: a deficiência em sua formação inicial. É essa deficiência que origina as diversas dificuldades com as quais o professor se depara ao atuar em sala de aula, como reorientar sua prática didático-metodológica, planejar as estratégias de ensino-aprendizagem, elaborar e desenvolver atividades compatíveis com a carga horária mínima de duas horas/aula semanais e, principalmente, avaliar as leis e princípios físicos que são relevantes para o ensino no Nível Médio. Conseqüentemente, o livro didático acaba ditando a rotina do professor. O livro é visto como um manual, um modelo a ser seguido capítulo a capítulo, induzindo o professor a considerar que quase tudo é importante. É o caso do ensino da Mecânica. O professor dedica um longo período do ano letivo na abordagem dos movimentos e aplicações das Leis de Newton e, no final, deixa de lado o ensino dos princípios de conservação de energia e da quantidade de movimento, conceitos fundamentais da Mecânica.

De acordo com a análise dos livros didáticos apresentada no capítulo 5º, a Física Moderna e Contemporânea é abordada pelos autores no volume 3, nos últimos capítulos, com exceção da obra *Quanta Física*, de Kantor et. al., que apresenta os conteúdos ao longo do livro. A pesquisa com os professores apontou que a proposta deve ser aplicada a alunos da 3ª série, por entenderem que o aprendiz do último ano tem conhecimento e maturidade suficientes para discutir questões que envolvam aspectos sociais e éticos, em que o desenvolvimento científico e tecnológico é relevante. Sugerimos ao professor, ao elaborar o seu plano de trabalho docente no início do ano letivo, reavalie os conteúdos que irá trabalhar, levando em conta a importância da inserção da FMC.

Estruturamos a versão preliminar da sequência didática a partir da interpretação das respostas dos professores ao questionário. A proposta, como já vimos, foi apresentada aos professores de Física do Programa de Desenvolvimento Educacional, que participaram da primeira fase da pesquisa, durante um curso com carga horária de 12 horas. Durante o encontro, os professores participaram ativamente e apresentaram diversas sugestões, que contribuíram significativamente para a reestruturação da proposta. As atividades da sequência didática foram reelaboradas, de forma a atender as expectativas dos professores do grupo. A proposta não foi testada em sala de aula, assim, essa questão fica em aberto para novas pesquisas.

A principal contribuição desta pesquisa é mostrar caminhos ao professor de Física do Nível Médio para o ensino de um tópico de Física Moderna e Contemporânea. Procuramos apresentar as atividades de forma didática, com possibilidade real de inserção dos conteúdos de radioatividade em sala de aula. O professor do Ensino Médio não pode mais deixar de lado a Ciência Contemporânea, uma vez que o nosso estudante espera ser preparado para conviver em uma sociedade em que os conhecimentos científicos e a capacidade de utilizar diferentes tecnologias são questões fundamentais, e a Física Moderna e Contemporânea faz parte deste contexto.

ACRO - *Centrale Nucléaire de Fukushima Dai-ichi: Reconstitution des évènements*. Relatório. Disponível em: <http://www.acro.eu.org/chronoFukushima2.html>. Acesso em: 03 nov. 2012.

AIEA – AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *The radiological accident in Goiania*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988.

AIKENHEAD, G. S.. *What is STS Science teaching?* In: SOLOMON, J.; AIKENHEAD, G. S.. *STS Education: International perspectives on reform*. New York: Teachers College Press, 1994. Disponível em: <http://www.usask.ca/education/people/aikenhead/sts05.htm>. Acesso em: 08 ago. 2012.

AMBIENTE BRASIL. *DDT – Diclorodifeniltricloreto*, [c2011]. Disponível em: http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agropecuário/artigo_agropecuário/ddt_-_diclorodifeniltricloreto.html. Acesso em: 26 jul. 2012.

AULER, D.; BAZZO, W. A.. Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v7n1/01.pdf> . Acesso em: 10 jul. 2012.

AULER, D.; DELIZOICOV, D.. *Interações entre ciência-tecnologia-sociedade no contexto da formação de professores de ciências*. 2002. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BALTHAZAR, W. F.; OLIVEIRA, A. L. *Partículas elementares no ensino médio: uma abordagem a partir do LHC*. São Paulo: Livraria da Física, 2010, 73 p..

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. Tradução: Luís Antero Reto e Augusto Pinheiro. Lisboa: Edições 70, 1977.

BEZERRA, R.. IEN produzirá iodo-123 ultrapuro. *Revista ECO-21*, Rio de Janeiro, edição 51, fevereiro de 2001. Disponível em: <http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=77>. Acesso em: 27 nov. 2012.

BIELLO, D. Destino de usina nuclear do Japão é incerto. *Scientific American Brasil*. São Paulo: Duetto Editorial, 2011. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/destino_de_usina_nuclear_no_japao_e_incerto.html. Acesso em: 06 nov. 2012.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio*. Brasília: MEC, 1999.

_____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *PCNs+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais - ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília: MEC, SEMTEC,

2002. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2006.

_____. Ministério da Educação. Secretaria Executiva. Secretaria de Educação Básica. *Guia de Livros Didáticos PNLD 2012: Física – Ensino Médio*. Brasília: MEC, 2011a.

_____. Ministério de Minas e Energia. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. *Radiações nucleares: usos e cuidados*. In: *Radiações nucleares*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. Ministério de Minas e Energia. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. *Resumo genérico para comparação de usinas em Fukushima, Japão (reator a água fervente - BWR) e Angra, Brasil (reator a água pressurizada - PWR)*. Rio de Janeiro, 2011b. Disponível em: http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/Comparacao_BWR_PWR.pdf. Acesso em 28 nov. 2012.

_____. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás – Eletronuclear. *Panorama da energia nuclear no mundo*: edição julho 2011. Rio de Janeiro, 2011c. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=GxTb5TAen5E%3d&tabid=297>. Acesso em: 17 jan. 2013.

_____. Ministério de Minas e Energia. Eletronuclear. *Estudo de impacto ambiental da unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto*. V. 1. Angra dos Reis, [2003?]. Disponível em: http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v01_02_caracterizacao.html. Acesso em: 17 jan. 2013.

BROCKINGTON, G; PIETROCOLA, M. *A realidade escondida: a dualidade onda-partícula para estudantes do ensino médio*. 2005, 268 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CARDOSO, E. M.. *Aplicações da energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, [200-]a. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/aplica.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Programa de integração CNEN- PIC*: módulo de informação técnica. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]b. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

CARVALHO, A. M. P.. *Pesquisa em ensino de ciências: objetivos e desafios*. Palestra, Universidade Estadual de Maringá, 21 de março de 2012.

CARVALHO, A. M. P. et al. *Ciências no ensino fundamental*. São Paulo: Scipione, 1998.

CARVALHO, A. M. P.; SASSERON, L. H. *Abordagens histórico-filosóficas em sala de aula: questões e propostas*. In: CARVALHO, A. M. P. (Org.) et al. *Ensino de física*. São Paulo: Cengage Learning, 2010, cap. 5, p. 107–140.

CARVALHO, A. M. P.; VANNUCCHI, A. O currículo de física: inovações e tendências nos anos noventa. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 1, n. 1, p. 3-19, 1996. Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=ienci&cod=ocurriculodefisicainovac>. Acesso em: 27 jul. 2005.

CHESSER, R. K.; BAKER, J. R.. Ensinaamentos de Chernobyl. *Scientific American Brasil: os riscos e as soluções da energia nuclear*, edição especial, 2011, p. 40 – 47.

CHIARELLI, R. A.; MOREIRA, M. A.. *Física moderna e contemporânea no ensino médio: é possível abordar conceitos de mecânica quântica?* 2006, 178 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10023/000593450.pdf?sequence=1>. Acesso em: 09 jan. 2012.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Entendendo um pouco sobre as doses de radiação e a sua unidade de medida sievert*. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/entendendo_radiacao.pdf. Acesso em: 21 nov. 2012.

CUSTÓDIO, J. F.; PIETROCOLA, M. Princípios nas ciências empíricas e o seu tratamento em livros didáticos. *Ciência & Educação*, v.10, n. 3, p. 383-399, 2004.

DANHONI NEVES, M. C.; RESQUETTI, S. O. Avaliação sobre a avaliação de ciências no Paraná (1996-2000). *Estudos em avaliação educacional*, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 43-75, jan./abr. 2006.

DEUTCH, J. M.; MONIZ, E. J.. Opção nuclear. *Scientific American Brasil: os riscos e as soluções da energia nuclear*, edição especial, 2011, p. 20-25.

EVOLUÇÃO dos modelos atômicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química. Porto Alegre, [200-]. Disponível em: http://www.iq.ufrgs.br/ead/fisicoquimica/modelosatomicos/modelo_dalton.html. Acesso em: 13 nov. 2012.

FARIA, S. L. *O que é radioatividade*. São Paulo: Editora Brasiliense, 1989, 72 p..

FUCHS, A. R. *A física moderna*. Tradução: Normando Celso Fernandes e Alberto Luís da Rocha Barros. São Paulo: Polígono, 1972, 359 p..

FURIÓ, C. et al.. Finalidades de la enseñanza de las ciencias en la secundaria obligatoria. ¿alfabetización científica o preparación propedéutica? *Enseñanza de las ciencias*, v. 19, n. 3, p. 365-376, 2001. Disponível em: <http://ddd.uab.es/pub/edlc/02124521v19n3p365.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2012.

FUSINATO, P. A.. *Formação de professores de física e a prática docente*. In: DANHONI NEVES et. al. (Org^s). *Reflexões sobre o ensino de física no ensino médio: um universo sem fronteiras*. Maringá: Massoni, 2009, p. 11 – 24.

FUSINATO, P. A.; PEREIRA, R. F.. *A inserção de física moderna e contemporânea (FMC) no ensino médio: cursos teóricos, produção de oficinas e de unidades didáticas (2010-2011)*. Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2011.

GASPAR, A. *O livro didático é necessário?* In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 15., 2003, Curitiba. Atas ... Curitiba: 2003, p. 124-126.

GIL-PÉREZ, D. ; VILCHES, A. *Importância da educação científica na sociedade actual*. In: CACHAPUZ et al. *A necessária renovação do ensino das ciências*. São Paulo: Cortez, 2005, cap. 1, p. 19–34.

GOIÁS. Secretaria de Estado da Saúde de Goiás. *A história do acidente radioativo em Goiânia*. Goiânia: 2013. Disponível em: <http://www.saude.go.gov.br/index.php?idMateria=85873>. Acesso em: 03 set. 2013.

GOLDEMBERG, J. *News and views: perspectives for nuclear energy in Brazil after Fukushima*. Brazilian Journal of Physics, v. 41, p. 103-106, 2011. Disponível em: http://download.springer.com/static/pdf/681/art%253A10.1007%252Fs13538-011-0027-0.pdf?auth66=1359574221_6b850d9ccbe6174191f53bb675d4381e&ext=.pdf. Acesso em: 28 mar. 2012.

GONÇALVES, O. D. Brasil ainda hesita na área da energia nuclear. *Scientific American Brasil: os riscos e as soluções da energia nuclear*, edição especial, 2011, p. 34-39.

GONÇALVES, O. D.; ALMEIDA, I. P. S.. A energia nuclear e seus usos na sociedade. *Ciência Hoje*, v. 37, n. 220, 2005, p. 36-44. Disponível em: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf. Acesso em: 26 set. 2011.

GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C.. V. 3. *Física e realidade*. São Paulo: Scipione, 2011.

GREENPEACE. *Memorial césio-137*. 200-. Disponível em: http://www.greenpeace.org.br/nuclear/cesio/flash_cesio.html. Acesso em: 06 out. 2013.

GUNDERSEN, A. *The Echo Chamber: Regulatory Capture and the Fukushima Daiichi Disaster*. Lessons from Fukushima: Relatório do Greenpeace Internacional. Amsterdam: 28 de fevereiro de 2012. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/nuclear/2012/Fukushima/Lessons-from-Fukushima.pdf>. Acesso em: 12 out. 2012.

HANNUM, W. H.; MARSH, G. E.; STANFORD, G. S.. Lixo nuclear bem reciclado. *Scientific American: os riscos e as soluções da energia nuclear*, edição especial, 2011, p. 48-55.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Tradução: Trieste Freire Ricci. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011, 744 p..

JOHNSON, T.. *O desastre nuclear de Chernobyl*. [Filme-documentário]. Direção de Thomas Johnson, produção de Hind Saïh. Chernobyl: Play Films, Discovery Networks International, 2005. Son., color. (1h33min). Narrado e legendado. Português. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=gD_a2RGipGU. Acesso em: 03 set. 2013.

KREY, I.; MOREIRA, M. A. Abordando tópicos de física nuclear e radiação em uma disciplina de estrutura da matéria do currículo de licenciatura em ciências através de situações-problema. *Latin-American Journal of Physics Education*, v. 3, n. 3, p. 595–605, 2009. Disponível em: http://journal.lapen.org.mx/sep09/17_LAJPE_304_Isabel_Krey.pdf. Acesso em: 04 ago. 2011.

KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Editora Perspectiva S. A., 2003, 257 p..

LINSINGEN, I.. *O enfoque CTS e a educação tecnológica: origens, razões e convergências curriculares*. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://srv.emc.ufsc.br/nepet/Artigos/Texto/CTS%20e%20EducTec.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2012. Artigo científico.

LOBATO, T; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. *Ciência & Educação*, v. 11, n. 1, p. 119-132, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v11n1/10.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2012.

MARSHALL, R.. *O início do fim*. Tradução: Geni Hirata. Rio de Janeiro: Record, 1990, 175 p..

MARTINS, J. B. *História da energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/historia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

MARTINS, R. A. *A descoberta da radioatividade*. Campinas: [s.n.], 1998. Disponível em: <http://www.ghc.usp.br/server/pdf/ram-59.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2012. Artigo científico.

_____. *Becquerel e a descoberta da radioatividade: uma análise crítica*. Campina Grande: Editora da Universidade Estadual da Paraíba; São Paulo: Livraria da Física, 2012, 482 p..

MATSON, J. Resumo de fatos da radiação em Fukushima. *Scientific American Brasil*. São Paulo: Duetto Editorial, 2011. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo_de_fatos_sobre_a_radiacao_em_fukushima.html. Acesso em: 06 nov. 2012.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 12, n. 3, p. 164-214, dez. 1995.

MEGID NETO, J.; FRACALANZA, H. O livro didático de ciências: problemas e soluções. *Ciência & Educação*, v. 9, n. 2, p. 147-157, 2003.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R. *Tendências das pesquisas sobre o ensino de física moderna e contemporânea apresentadas nos ENPEC*. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6, 2007, Florianópolis-SC, Atas... Florianópolis: 2007. Disponível em: <http://www.fae.ufmg.br/abrapec/viempec/viempec/CR2/p941.pdf>. Acesso em: 28 set. 2011.

_____. *A física moderna e contemporânea no ensino médio e a formação de professores: racionalidade técnica ou racionalidade comunicativa?* In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 18, 2009, Vitória - ES, Atas... Vitória: 2009. Disponível em: <http://www.sbfl.sbfisica.org.br/eventos/snef/xviii/sys/resumos/T0459-1.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2011.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio. *Ciência e Educação*, v. 15, n. 3, p. 557-580, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v15n3/07.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2011.

MOREIRA, M. A.. *Questionários*. In: MOREIRA, M. A.; VEIT, E. A.. *Ensino superior: bases teóricas e metodológicas*. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária Ltda., 2010, p. 163-172.

MOURÃO, R. R. F. Hiroshima e Nagasaki: razões para experimentar a nova arma. *Scientiae Studia*, v. 3, n. 4, 2005, p. 683-710. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ss/v3n4/a10v3n4.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2012.

MURA, J.; LOPES, N. B. *Física aplicada à biologia e farmácia – parte I*. Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1985.

NOUAILHETAS. *Radiações ionizantes e a vida*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em: http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/rad_ion.pdf. Acesso em: 26 set. 2011.

OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007, 81p..

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. *Física das radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 296 p..

OLIVEIRA, I. S. *Física moderna: para iniciados, interessados e aficionados*. V. 2. São Paulo: Livraria da Física, 2005, 291 p..

OLIVEIRA, F. F. de; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v29n3/a16v29n3.pdf>. Acesso em: 21 set. 2008.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID57/v5_n1_a2000.pdf. Acesso em: 08 jul. 2011.

_____. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 18, n. 2, p. 135-151, ago. 2001. Disponível em: <http://www.fsc.ufsc.br/cbef/port/18-2/artpdf/a1.pdf>. Acesso em: 19 jul. de 2011.

PEDUZZI, L. O. Q. *Do átomo grego ao átomo de Bohr: o perfil de um texto para a disciplina Evolução dos Conceitos da Física*. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 9, 2004, Jaboticabal-MG, Atas... Jaboticabal: 2004. Disponível em: <http://www.sbfl.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/atas/comunicacoes/co33-3.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2011.

PEREIRA, R. F.; FUSINATO, P. A.. *Formação inicial de professores: o percurso de alunos de estágio supervisionado em física da UEM, envolvendo a proposta da prática reflexiva, o lúdico e o uso de tecnologias*. 2013. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

PEREIRA, A.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 14, n. 3, p. 393-420, 2009. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID224/v14_n3_a2009.pdf. Acesso em: 18 jul. 2011.

PÉREZ, H.; SOLBES, J. Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 21, n. 1, p. 135-146, 2003. Disponível em: <http://ddd.uab.es/pub/edlc/02124521v21n1p135.pdf>. Acesso em: 28 set. 2011.

PIETROCOLA, M. et al.. *Física em contextos: pessoal, social, histórico*. V. 3. São Paulo: FTD, 2010.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999. Disponível em: <http://journal.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6873/6333>. Acesso em: 17 jan. 2012.

PIORE, A. Planejando o cisne negro. *Scientific American: os riscos e as soluções da energia nuclear*, edição especial, 2011, p. 6-11.

RERF - RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION. *Frequently asked questions about the atomic-bomb survivor research program*, c2007. Disponível em: http://www.rerf.jp/index_e.html. Acesso em: 19 fev. 2013.

RESQUETTI, S. O.; DANHONI NEVES, M. C.. *Como se movem os projéteis nos livros didáticos de física e no vestibular? Inquirindo o Galileu sintético de hoje*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

RHODES, R. *The making of the atomic bomb*. 25 ed. Nova Iorque: Simon & Schuster Paperbacks, 2012, 838 p.

RICARDO, E. C. *Implementação dos PCNs em sala de aula: dificuldades e possibilidades*. In: BRASIL. Ministério da Educação. Coleção Explorando o Ensino - Física, v. 7, p. 18–23, 2003.

_____. *Problematização e contextualização no ensino de física*. In: CARVALHO, A. M. P., et al.. *Ensino de física: coleção ideias em ação*. São Paulo: Centage Learning, p. 29-51, 2010.

RICARDO, E. C.; ZYLBERSTAJN, A. O ensino das ciências no nível médio: um estudo sobre as dificuldades na implementação dos Parâmetros Curriculares Nacionais+. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 3: p. 351-370, dez. 2002. Disponível em: <http://www.fsc.ufsc.br/cbef/port/19-3/artpdf/a4.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2011.

_____. *O ensino de física em nível médio e os Parâmetros Curriculares Nacionais na formação inicial*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 9, 2004, Jaboticatubas-MG. Atas ..., Jaboticatubas: 2004. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/atas/comunicacoes/co22-1.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2011.

SAFFIOTI, W. *Fundamentos de energia nuclear*. Petrópolis: Editora Vozes, 1982, 177 p..

SANCHES, M. B.; et al. *A inserção da física moderna e contemporânea no currículo do ensino médio*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 10, 2006, Londrina-Pr. Atas ..., Londrina: 2006. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/x/atas/resumos/T0076-1.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2011.

SANTOS, W. L. P.; MORTIMER, E. F.. Uma análise de pressupostos teóricos da abordagem C-T-S (Ciência – Tecnologia – Sociedade) no contexto da educação brasileira. *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 2, n. 2, 2002. Disponível em: <http://ufpa.br/ensinofts/artigos2/wildsoneduardo.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2012.

SASSERON, L. H. *Alfabetização científica e documentos oficiais brasileiros: um diálogo na estruturação do ensino da Física*. In: CARVALHO, A. M. P. et al.. *Ensino de física: coleção ideias em ação*. São Paulo: Centage Learning, p. 1-28, 2010.

SBF - SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. Um novo projeto da SBF - Física para o Brasil: pensando o futuro do ensino de física no país. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 3, p. 257-258, set. 2003. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v25_257.pdf. Acesso em: 18 jul. 2011.

_____. *Pensando o futuro: o desenvolvimento da física e sua inserção na vida social e econômica do país*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2005, 248 p..

SBMN - SOCIEDADE BRASILEIRA DE MEDICINA NUCLEAR. *Dúvidas frequentes: Quando usar iodo-131 ou iodo-123 ou tecnécio-99m nas cintilografias da tireoide? O preparo é diferente para estes isótopos?* São Paulo, 2007. Disponível em: http://www.sbm.org.br/site/duvidas_frequentes/visualiza/35. Acesso em: 10 jan. 2013.

SEED – SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO DO PARANÁ. *Diretrizes curriculares da educação básica: Física*. Curitiba: SEED, 2008. Disponível em:

http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/diretrizes/dce_fis.pdf. Acesso em: 03 ago. 2009.

SEGRÈ, E. *Dos raios X aos quarks: físicos modernos e suas descobertas*. Brasília: Editora da UnB, 1987, 345 p..

SILVA, A. M. T. B.. *Representações sociais: uma contraproposta ao estudo das concepções alternativas no ensino de física*. 1998. 121 p. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SIQUEIRA, M. R. P.; PIETROCOLA, M.. *Do visível ao indivisível: uma proposta de física de partículas elementares para o ensino médio*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SIQUEIRA, M.; PIETROCOLA, M.; UETA, N. *A física moderna e contemporânea em sala de aula: uma atividade com os raios X*. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 17, 2007, São Luís - MA. Atas ... São Luís: 2007. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvii/atas/resumos/T0410-1.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2011.

SOARES, L. *Lições do acidente de Fukushima*. Aula inaugural (COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.con.ufrj.br/pdfs/fukushima.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2013.

SOLBES, J.; TRAVER, M. J. La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 14, n. 1, p. 103-112, 1996.

_____. Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de física y química: mejora de la imagen de la ciência y desarrollo de actitudes positivas. *Enseñanza de las Ciencias*, 2001, v. 19, n. 1, p. 151-162. Disponível em: <http://enciencias.uab.es/revistes/19-1/151-162.pdf>. Acesso em: 29 maio 2012.

SORPRESO, T. P.; BABICHAK, C. C.; ALMEIDA, M. J. P. M.. *Condições de produção iniciais de estudantes de licenciatura sobre a física moderna e contemporânea*. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 12, 2010, Águas de Lindoia – SP. Atas... Águas de Lindoia: 2010. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/xii/sys/resumos/T0094-1.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2011.

SULEIDE - SUPERINTENDÊNCIA LEIDE DAS NEVES FERREIRA. Secretaria da Saúde do Estado de Goiás. *Césio-137: saiba como ocorreu o acidente - a história, fatos e relatos*. Goiânia: 2012. Disponível em: <http://www.cesio137goiania.go.gov.br/index.php?idEditoria=3823>. Acesso em: 03 set. 2013.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992. Disponível em: <http://www.fsc.ufsc.br/cbef/port/09-3/artpdf/a2.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2011.

TERREMOTO, L. A. A.. *Fundamentos de tecnologia nuclear: reatores*. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP). Apostila: Programa da Pós-Graduação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo: IPEN, 2004. Disponível em: <http://www.ipen.br/conteudo/upload/201106290947410.TNR5764.Apostila.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2013.

THE NATIONAL MUSEUM OF NUCLEAR SCIENCE & HISTORY. *The Manhattan Project*. Albuquerque, EUA. Disponível em: <http://www.nuclearmuseum.org/see/online-museum/history/the-manhattan-project/>. Acesso em: 04 jan. 2013.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Tradução: Ronaldo Sergio de Biasi. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos Editora S. A., 2006, 515 p..

VALADARES, E. C.; MOREIRA, A. M.. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, 1998. Disponível em: <http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10026/9273>. Acesso em: 30 jan. 2012.

WALD, M. L. Quando a energia nuclear é competitiva. *Scientific American Brasil: os riscos e as soluções da energia nuclear*, edição especial, 2011, p. 12-19.

YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. V. 3. *Física para o ensino médio*. São Paulo: Saraiva, 2010.

ZABALA, A. *A prática educativa: como ensinar*. Porto Alegre: Editora Artes Médicas Sul Ltda., 1998.

REFERÊNCIAS DAS OBRAS DIDÁTICAS

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. V. 3. *Física*. São Paulo: Saraiva, 2010.

GASPAR, A.. *Compreendendo a física*. V. e. São Paulo: Ática, 2010.

GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C.. V 3. *Física e realidade*. São Paulo: Scipione, 2011.

KANTOR, C. A.; PAOLIELLO JUNIOR, L. A.; MENEZES, L. C.; BONETTI, M. C.; CANATO JUNIOR, O.; ALVES, V. M.. V. 3. *Quanta física*. São Paulo: PD, 2010.

LUZ, A. M. R. L.; ALVARENGA, B.. V. 3. *Curso de física*. São Paulo: Scipione, 2011.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; ANDRADE, R.; ROMERO, T. R.. *Física em contextos: pessoal – social - histórico*. V. 3. São Paulo: FTD.

SANT'ANNA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELL, W.. V. 3. *Conexões com a física*. São Paulo: Moderna, 2010.

TORRES, C. M. A.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T.. V. 3. *Física - ciência e tecnologia*. São Paulo: Moderna, 2010.

XAVIER, C.; BARRETO, B.. V. 3. *Física aula por aula*. São Paulo: FTD, 2010.

YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. V. 3. *Física para o ensino médio*. São Paulo: Saraiva, 2010.

ATIVIDADE 1

ACRO - *Centrale Nucléaire de Fukushima Dai-ichi: Reconstitution des évènements*. Relatório. Disponível em: <http://www.acro.eu.org/chronoFukushima2.html>. Acesso em: 03 nov. 2012.

BIELLO, D. Destino de usina nuclear do Japão é incerto. *Scientific American Brasil*. São Paulo: Duetto Editorial, 2011. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/destino_de_usina_nuclear_no_japao_e_incerto.html. Acesso em: 06 nov. 2012.

BOILLEY, D. *Emergency planning and evacuation*. Lessons from Fukushima: Relatório do Greenpeace Internacional. Amsterdam: 28 de fevereiro de 2012. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/nuclear/2012/Fukushima/Lessons-from-Fukushima.pdf>. Acesso em: 12 out. 2012.

GUNDERSEN, A. *The Echo Chamber: Regulatory Capture and the Fukushima Daiichi Disaster*. Lessons from Fukushima: Relatório do Greenpeace Internacional. Amsterdam: 28 fev. 2012. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/nuclear/2012/Fukushima/Lessons-from-Fukushima.pdf>. Acesso em: 12 out. 2012.

MATSON, J. Resumo de fatos da radiação em Fukushima. *Scientific American Brasil*. São Paulo: Duetto Editorial, 2011. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo_de_fatos_sobre_a_radiacao_em_fukushima.html. Acesso em: 06 nov. 2012.

PIORE, A. Planejando o cisne negro. *Scientific American*, edição especial, n. 42, p. 6-11, 2011.

SOARES, L. *Lições do acidente de Fukushima*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, aula inaugural, Rio de Janeiro, 2011.

Referências dos vídeos

VÍDEO 1. *Terremoto no Japão - Jornal Nacional 11-03-2011*. YouTube. 03min50s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=LaJeyqYQI5g>. Acesso em: 02 jul. 2013.

VÍDEO 2. *Tsunami Japan real video 2 compilation*. YouTube. 03min02s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=y0ajWtrs3YY>. Acesso em: 24 jul. 2013.

VÍDEO 3. *Entenda o problema nos reatores de Fukushima*. YouTube. 01min12s: son., color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZUYqGLUIxSY>. Acesso em: 14 jan. 2013.

VÍDEO 4. *Terremoto no Japão: cresce a preocupação com as usinas nucleares*. YouTube. 04min13s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=e93Ke5ktbHU>. Acesso em: 27 nov. 2012.

VÍDEO 5. *Japão: consequências da radiação*. YouTube. 03min05s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=z9p5oVuFwu0>. Acesso em: 12 out. 2012.

Referências de vídeos complementares

DAY when tsunami struck - Japan 2011. YouTube. 19min58s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=eeLlySDmjuw>. Acesso em: 27 nov. 2012.

MAPA de visualizacion de todos los terremotos de 2011 em Japón. YouTube. 09min57s: color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=aeCb8QVHL4o>. Acesso em: 29 nov. 2012.

ATIVIDADE 2

FUCHS, A. R. *A física moderna*. Tradução: Normando Celso Fernandes e Alberto Luís da Rocha Barros. São Paulo: Polígono, 1972, 359 p..

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Tradução: Trieste Freire Ricci. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011, 744 p..

MARTINS, R. de A. *A descoberta da radioatividade*. Campinas: [s.n.], 1998. Disponível em: <http://www.ghc.usp.br/server/pdf/ram-59.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2012. Artigo científico.

_____. *Becquerel e a descoberta da radioatividade: uma análise crítica*. Campina Grande: Editora da Universidade Estadual da Paraíba; São Paulo: Livraria da Física, 2012, 482 p..

OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007, 81p..

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. *Física das radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 296 p..

Referências dos vídeos

VÍDEO 6. *Crookes Maltese Cross tube*. YouTube. 00min41s: color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI. Acesso em: 22 out. 2012.

VÍDEO 7. *Descoberta do elétron*. YouTube. 04mi20s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen>. Acesso em: 22 out. 2012.

VÍDEO 8. *Rayos catódicos*. YouTube. 02min: color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen&NR=1>. Acesso em: 22 out. 2012.

VÍDEO 9. *Ponto Ciência – Experimento de Becquerel*. YouTube. 06min47s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=Do-p-GdWUc0>. Acesso em: 09 jul. 2013.

ATIVIDADE 3

CARDOSO, E. M. *Programa de integração CNEN- PIC: módulo de informação técnica*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

CARDOSO, E. M. et al. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

EVOLUÇÃO dos modelos atômicos. [S.I.: s.n., 200-]. Disponível em: http://www.iq.ufrgs.br/ead/fisicoquimica/modelosatomicos/modelo_dalton.html. Artigo científico.

FARIA, S. L. *O que é radioatividade*. São Paulo: Editora Brasiliense, 1989, 72 p..

FUCHS, W. R. *Física moderna*. Tradução de Normando Celso Fernandes e Alberto Luís da Rocha Barro. São Paulo: Polígono, 1972, 359 p..

FUSINATO, P. A.; PEREIRA, R. F.. *A inserção de física moderna e contemporânea (FMC) no ensino médio: cursos teóricos, produção de oficinas e de unidades didáticas (2010-2011)*. Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2011.

GONÇALVES, O. D.; ALMEIDA, I. P. S.. A energia nuclear e seus usos na sociedade. *Ciência Hoje*, v. 37, n. 220, 2005, p. 36-44. Disponível em: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf. Acesso em: 26 set. 2011.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Tradução de Trieste Freire Ricci. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011, 768 p..

OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007, 81 p..

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. *Física das radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 296 p..

PIETROCOLA, M. et al.. *Física em contextos: pessoal, social, histórico*. São Paulo: FTD, 2010. v. 3.

SAFFIOTI, W. *Fundamentos de energia nuclear*. Petrópolis: Vozes, 1982, 177 p..

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Tradução: Ronaldo Sergio de Biasi. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2006, 515 p..

Referências dos vídeos

VÍDEO 10. *Vídeo – Experimento de Rutherford*. YouTube. 04min08s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=tw1-4TlrcwU>. Acesso em: 09 jul. 2013.

VÍDEO 11. *Tipos de radiação: partícula alfa, beta e radiação gama*. YouTube. 02min09s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=N1TMhRKiOBk>. Acesso em: 09 jul. 2013.

VÍDEO 12. *Fissão nuclear, nuclear fission*. YouTube. 01min36s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=ehL4HoyRqdw>. Acesso em: 08 jul. 2013.

VÍDEO 13. *Reação em cadeia*. YouTube. 00min25s: son.,color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=S6vj-Qk2tBk>. Acesso em: 16 abr. 2013.

VÍDEO 14. *Ciclo do urânio (versão em libras)*. YouTube. 06min08s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=1wWFstfkncA>. Acesso em: 16 jan. 2013.

VÍDEO 15. *Nagasaki Hiroshima new released movie* – YouTube. 04min38s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=4BtmT47GbTg>. Acesso em: 08 jul. 2013.

Referências das simulações

DECAIMENTO alfa. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay. Acesso em: 14 jul. 2013.

DECAIMENTO beta. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/beta-decay. Acesso em: 14 jul. 2013.

FISSÃO nuclear. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission. Acesso em: 14 jul. 2013.

MONTE um átomo. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/build-an-atom. Acesso em: 14 jul. 2013.

PHET – INTERACTIVE SIMULATIONS. University of Colorado at Boulder. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/. Acesso em: 14 jul. 2013.

ATIVIDADE 4:

Sugestões de referências para pesquisa em grupo

CARDOSO, E. M. et al. *Aplicações da energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]a. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/aplica.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Programa de integração CNEN- PIC*: módulo de informação técnica. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]b. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

MERÇON, F. *Radiações: riscos e benefícios*. [S.I., s.n., 200-]. Disponível em: http://web.ccead.pucrio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/SL_radiacoes_riscos_e_beneficios.pdf. Acesso em: 13 fev. 2013.

OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007, 81 p..

PEZZO, M. Datação por carbono-14. *Univerciencia*, dez. 2002, p 4-6. Disponível em: http://www.univerciencia.ufscar.br/n_2_a1/carbono.pdf. Acesso em: 21 jul. 2013.

SILVA, M. R. *Investigando as aplicações da radioatividade na sociedade*. Curitiba, 2008. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/970-2.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2013.

Referências de alguns vídeos para auxiliar nas pesquisas das equipes:

BENEFÍCIOS da radioatividade na agricultura. YouTube. 02min42s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=IzkLm_FI8IY. Acesso em: 21 jul. 2013.

ENERGIA nuclear. YouTube. 03min27s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=uS7WJ0p19Po>. Acesso em: 21 jul. 2013.

ENERGIA nuclear e seus benefícios. YouTube. 02min53s: son. Color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=AyMp_uMebHY. Acesso em: 21 jul. 2013.

LIXO radioativo – YouTube. 02min57s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=AG3FEs8onOk>. Acesso em: 21 jul. 2013.

MEDICINA nuclear – Paulo Schiavon. YouTube. 01min40s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=SnZr7MwS_vo. Acesso em: 21 jul. 2013.

TOMOGRAFIA por emissão de pósitrons. YouTube. 01min31s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=dh7IJKQTVhE>. Acesso em: 21 jul. 2013.

ATIVIDADE 5

Algumas referências para auxiliar as pesquisas em grupo:

BITTENCOURT, A. M. *Césio 137: relatos da segunda geração do maior acidente radiológico da história*. Bauru: [s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.uel.br/grupo-pesquisa/gepal/primeirosimposio/completos/alexandrebittencourt.pdf>. Acesso em: 03 set. 2011. Artigo científico.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás – Eletronuclear: *Análise histórica de acidentes nucleares: o acidente de Three Mile Island – Unidade 2 (TMI-2)*. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v06_12_analise.html. Acesso em: 21 jul. 2013.

CARDOSO, E. M. *Programa de integração CNEN- PIC: módulo de informação técnica*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

CARDOSO, E. M. et al. *Energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

CHEMELLO, E. *Césio-137: a tragédia radioativa do Brasil*. Disponível em: <http://www.quimica.net/emiliano/artigos/2010agosto-cesio137.pdf>. Acesso em: 03 set. 2011.

GOIÁS. Secretaria de Estado da Saúde de Goiás. *A história do acidente radioativo em Goiânia*. Goiânia: 2013. Disponível em: <http://www.saude.go.gov.br/index.php?idMateria=85873>. Acesso em: 03 set. 2013.

GREENPEACE. *Acidente em Three Mile Island*. [S.I., 2009]. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Blog/acidente-em-three-mile-island/blog/761/>. Acesso em: 21 jul. 2013.

MARTINS, J. B. *História da energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/historia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

MOURÃO, R. R. F. Hiroshima e Nagasaki: razões para experimentar a nova arma. *Scientiae Studia*, v. 3, n. 4, 2005, p. 683-710. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ss/v3n4/a10v3n4.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2012.

NAKAZAWA, K. *Gen pés descalços: uma história de Hiroshima*. Tradução: Sofia Valtas. 4. ed. São Paulo: Conrad Editora do Brasil Ltda., 2002, 4 volumes.

SULEIDE - SUPERINTENDÊNCIA LEIDE DAS NEVES FERREIRA. Secretaria da Saúde do Estado de Goiás. *Césio-137: saiba como ocorreu o acidente - a história, fatos e relatos*. Goiânia: 2012. Disponível em: <http://www.cesio137goiania.go.gov.br/index.php?idEditoria=3823>. Acesso em: 03 set. 2013.

THE NATIONAL MUSEUM OF NUCLEAR SCIENCE & HISTORY. *The Manhattan Project*. Albuquerque, EUA. Disponível em: <http://www.nuclearmuseum.org/see/online-museum/history/the-manhattan-project/>. Acesso em: 28 fev. 2013.

Referências de alguns vídeos para auxiliar nas pesquisas das equipes:

CIENTISTAS explicam os efeitos da radiação no corpo humano e no meio ambiente – Jornal Nacional. YouTube. 03min37s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=I7XUwpQ_PKM. Acesso em: 09 jul. 2013.

COMO foi o acidente nuclear com o césio-137 no Brasil. YouTube. 07min38s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=6gK8Svm_gpc. Acesso em: 19 jul. 2013.

DISCOVERY Channel - hora zero - o desastre de Chernobyl. YouTube. 46min43s: son. (leg.), color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=FcrkF78DhR8>. Acesso em: 19 jul. 2013.

DOCUMENTÁRIO – Hiroshima - o dia seguinte // NatGeo. YouTube. 45min10s: son. (leg.), color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=Dyt7bs4cNXY>. Acesso em: 13 set. 2012.

EFEITOS da radiação. YouTube. 10min28s: son. Color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=MquDgivy70E>. Acesso em: 09 jul.2013.

ENTENDA o acidente nuclear de Chernobyl. YouTube. 10min29s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=9-uDPiNVBIA>. Acesso em: 19 jul. 2013.

FANTÁSTICO 1979 – Acidente nuclear nos EUA. YouTube. 05min01s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=awGIX6arnXo>. Acesso em: 19 jul. 2013.

GEN pés descalços legendado PT-BR. YouTube. 10min55s: son. (leg.), color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=FHYCSHEldSA>. Acesso em: 09 jul. 2013.

LINHA Direta Justiça – Césio 137. YouTube. 37min39s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=MfshO3PvIYs>. Acesso em: 19 jul. 2013.

THE History Channel - Maravilhas modernas "Projeto Manhattan". YouTube. 44min14s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=v9pYDa6U-Fo>. Acesso em: 22 mar. 2013.

TOP 10 bombas nucleares/nuclear bombs. YouTube. 08min06s: son. Color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=e7Jjw0y_2kM. Acesso em: 08 jul. 2013.

APÊNDICES

RADIAÇÕES NUCLEARES: CONTEÚDOS PROPOSTOS PARA O ENSINO MÉDIO

A análise das respostas dos professores ao questionário revelou diversos entraves por eles encontrados para abordar tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Uma das dificuldades apontadas pelo grupo foi adequar os conteúdos científicos a uma forma didática de apresentá-los aos alunos.

O livro didático é uma das ferramentas que o professor tem a seu alcance para realizar a transposição do saber científico para o saber escolar; contudo, de acordo com o levantamento realizado acerca dos conteúdos apresentados em dez obras didáticas de Física que fazem parte do PNLD/2012, observamos que algumas delas não apresentam o tópico *radioatividade*, em outras, o conteúdo é tratado parcialmente, e em apenas duas obras o tema é apresentado de forma mais detalhada.

Apresentamos nesta seção, os conteúdos básicos para o estudo da *radioatividade* no Ensino Médio, mas de forma mais detalhada daquela exposta no capítulo 6°. Conforme já mencionamos, os conteúdos selecionados são os seguintes: (i) o conceito de átomo e os modelos atômicos; (ii) o núcleo atômico; (iii) isótopos e radioisótopos; (iv) radioatividade: emissões alfa, beta e gama; (v) decaimento radioativo; (vi) meia-vida radioativa; (vii) fissão nuclear; (viii) reação em cadeia; (ix) energia nuclear: o reator de fissão e a bomba atômica.

A.1. O CONCEITO DE ÁTOMO E OS MODELOS ATÔMICOS

A história da estrutura da matéria começou aproximadamente 2.500 anos atrás, com os filósofos gregos. Segundo Siqueira e Pietrocola (2006), Tales de Mileto (624-546 a. C.) teria introduzido a ideia de elemento primordial - o constituinte básico da matéria. Tales acreditava que esse elemento seria a *água*, enquanto para Anaxímenes de Mileto (570-500 a. C.) seria o *ar*. Para Xenófenos da Jônia (570-460 a.C.), a *terra* era o constituinte básico da matéria, e para Heráclito de Éfeso (540-480 a.C.), o *fogo*.

Empédocles de Akragas (490-431 a. C.) introduziu a ideia de que as substâncias eram constituídas pela combinação dos quatro elementos: terra, água, ar e fogo. Aristóteles de Estagira (384-322 a. C.) acrescentou mais quatro elementos - frio, quente, úmido e seco - que,

combinados dois a dois, resultariam nos elementos de Empédocles. Segundo o pensamento aristotélico, agrupando-se os elementos seco e frio obter-se-ia a terra; do seco e do quente resultaria o fogo; do úmido e quente, o ar; o úmido e frio daria a água (SIQUEIRA; PIETROCOLA, 2006). A teoria aristotélica, denominada de “teoria plena da matéria”, propunha que a matéria possuía uma estrutura perfeitamente contínua e poderia ser subdividida indefinidamente (BRASIL, 1984).

O primeiro conceito de átomo surgiu com Leucipo de Mileto e seu discípulo, Demócrito de Abdera, por volta de 450 a. C (BRASIL, 1984; OKUNO; YOSHIMURA, 2010). A ideia foi concebida considerando-se o fato de que, se uma dada substância fosse dividida inúmeras vezes, obter-se-ia uma partícula elementar que seria o constituinte fundamental da matéria, a qual recebeu o nome de *atomon*. Segundo essa teoria, todos os objetos da natureza seriam constituídos por átomos, que em grego significa indivisível. Diferentes substâncias seriam compostas por átomos diferentes ou combinações de átomos, e uma mesma substância poderia ser convertida em outra por meio de arranjos. Esta teoria foi denominada de “atomismo” ou de “teoria corpuscular da matéria”.

A teoria atômica da matéria caiu no esquecimento durante quatorze séculos, sufocada que foi pela teoria aristotélica. Durante a Renascença o atomismo foi redescoberto e, no século XVII, os pensadores retomaram a teoria corpuscular da matéria (BRASIL, 1984).

Em 1808 o inglês John Dalton (1766-1844) apresentou a primeira teoria atômica científica. Utilizando-se de resultados experimentais de reações químicas e pesagens minuciosas, Dalton concluiu que os átomos realmente existiam. Segundo sua teoria: i) toda matéria é constituída por diminutas partículas esféricas, maciças, neutras e indivisíveis chamadas átomos; ii) existe um número finito de átomos na natureza; iii) a combinação de tipos iguais ou diferentes de átomos origina os diferentes materiais (FUSINATO; PEREIRA, 2011). Dalton associou cada tipo de átomo a um elemento químico. Os átomos de um mesmo elemento seriam todos iguais em tamanho e peso, ideia que prevaleceu até a descoberta dos isótopos, em 1921. Ao explicar as reações químicas como resultado da união ou separação de átomos, introduziu o embrião do conceito de molécula.

No século XIX as experiências relacionadas ao eletromagnetismo colocaram em dúvida a indivisibilidade do átomo. Em 1897, experimentos realizados com o tubo de Crookes levaram Joseph John Thomson (1856-1940) a descobrir o elétron e assim caiu a ideia original de indivisibilidade do átomo. O elétron foi a primeira de muitas partículas elementares descobertas. Ora, se os átomos continham elétrons com carga elétrica negativa, deveriam

então existir partículas carregadas positivamente para neutralizar a matéria. Tal conclusão levou pesquisadores à elaboração de modelos atômicos, com base nos últimos resultados experimentais.

Em 1903 o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), da Universidade de Tóquio, propôs o modelo atômico conhecido como “saturnino”. Esse modelo previa que o núcleo atômico era muito grande, em analogia à massa do planeta Saturno. Os elétrons giravam em torno do núcleo ligados por forças eletrostáticas, em analogia aos anéis de Saturno que giravam ao redor do planeta ligados por forças gravitacionais.



Figura 1: Modelo atômico “saturnino”, de Nagaoka.

Fonte: <http://3.bp.blogspot.com/-4WIU5qE7HjE/Te78N6RMo8I/AAAAAAAAACo/bJlujM40PkA/s1600/modelo+de+Hantaro+Nagaoka+bmp.bmp>.

Thomson, em 1904, propôs um modelo para o átomo que ficou conhecido como “pudim de ameixas” ou “pudim de passas”. Neste modelo os elétrons estavam embebidos de um fluido, como se fossem ameixas imersas em um pudim, que continha a maior parte da massa do átomo e possuía carga elétrica positiva suficiente para neutralizar as cargas negativas dos elétrons.

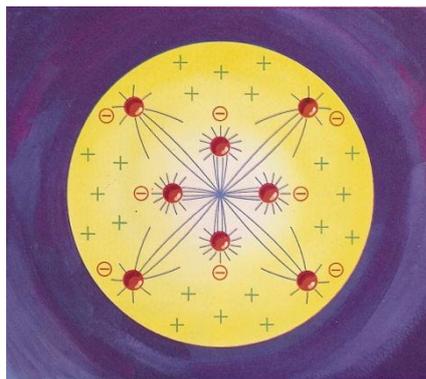


Figura 2: Modelo atômico do “pudim de passas”, de Thomson.
Fonte: Fuchs (1972, p. 92).

Okuno e Yoshimura (2010) comentam que, para descobrir qual dos dois modelos representava melhor o átomo, o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) realizou, juntamente com seus discípulos Geiger e Marsden, experimentos que revelaram que o átomo é praticamente um espaço vazio. No centro há uma região extremamente densa e de carga elétrica positiva, que Rutherford chamou de *núcleo*. Ao redor do núcleo giram os elétrons negativos, na região denominada *eletrosfera*.

Em 1911, os resultados experimentais de Rutherford e colaboradores os levaram a apresentar o modelo atômico conhecido como “planetário”, em comparação ao Sistema Solar, onde o Sol seria o núcleo e os elétrons seriam os planetas.

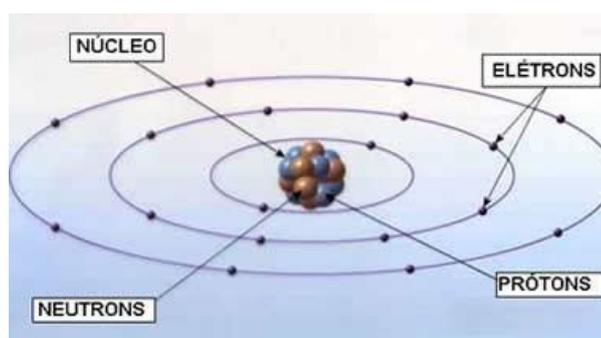


Figura 3: Modelo atômico “planetário”, de Rutherford.
Fonte: <http://n.i.uol.com.br/licaodecasa/ensmedio/fisica/numquan1.jpg>.

A analogia com o Sistema Solar é válida para dar uma visão da estrutura do átomo, porém não exprime a realidade. No sistema planetário os planetas se distribuem quase que no mesmo plano de rotação ao redor do Sol, havendo apenas um planeta em cada órbita, ao passo

que no átomo os elétrons se distribuem em até sete planos (ou camadas) de rotação ao redor do núcleo e, em cada camada, há um número definido de elétrons.

As conclusões de Rutherford mostraram que tanto o modelo de Nagaoka quanto o de Thomson apresentavam divergências com os resultados experimentais. O átomo não é maciço, como pensava Thomson, mas sim, formado por uma região central muito pequena se comparada ao diâmetro atômico. Comparando-se o modelo de Rutherford com o de Nagaoka, parece que um não difere do outro, porém no modelo de Rutherford os elétrons giram em torno do núcleo semelhantemente aos planetas ao redor do Sol, enquanto no de Nagaoka os elétrons são anéis negativos.

Não obstante, logo o modelo de Rutherford apresentou problemas. Pela teoria eletromagnética clássica, uma partícula acelerada emite continuamente radiação eletromagnética. Como o elétron está acelerado (movimento circular uniforme) em torno do núcleo, visto que a direção de sua velocidade varia constantemente, ao emitir radiação deveria perder energia e, com isso, deveria descrever uma trajetória espiralada, acabando por cair no núcleo, o que não acontece. Outro problema estava na frequência da radiação emitida, que não coincidia com aquela efetivamente medida. De acordo com a estrutura atômica de Rutherford, deveria existir um espectro eletromagnético contínuo independentemente do átomo emissor, todavia, alguns átomos só emitiam ondas em determinadas frequências características daquele átomo, não valendo o mesmo raciocínio para todos.

Em 1913 um novo modelo atômico foi proposto pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962). Bohr tomou como base o átomo mais simples, o de hidrogênio, para explicar o que o modelo de Rutherford não explicava. Com base na Mecânica Clássica de Newton e na Lei de Coulomb, Bohr igualou a força elétrica à força centrípeta e introduziu a teoria do fóton proposta por Planck e Einstein. Bohr resolveu, então, os problemas da teoria de Rutherford por meio de dois postulados. O primeiro foi que *os elétrons se movem em determinadas órbitas sem irradiar energia*, órbitas às quais chamou de estados estacionários. Normalmente, o elétron permanece na órbita de menor raio possível, chamada de estado fundamental. O segundo postulado foi que *os átomos irradiam quando ocorre a transição de um elétron de um estado estacionário para outro*, cuja frequência f da radiação emitida é dada pela diferença de energia ΔE entre os estados dividida pela constante de Planck h , ou seja: $f = \Delta E/h$. Com isso, Bohr conseguiu explicar as propriedades químicas gerais dos elementos e calcular a velocidade do elétron em diferentes órbitas, o raio das

órbitas permitidas e a energia total do elétron em cada uma delas, que ele chamou de “*níveis de energia*” (OKUNO; YOSHIMURA, 2010; TIPLER; LLEWELLYN, 2006).

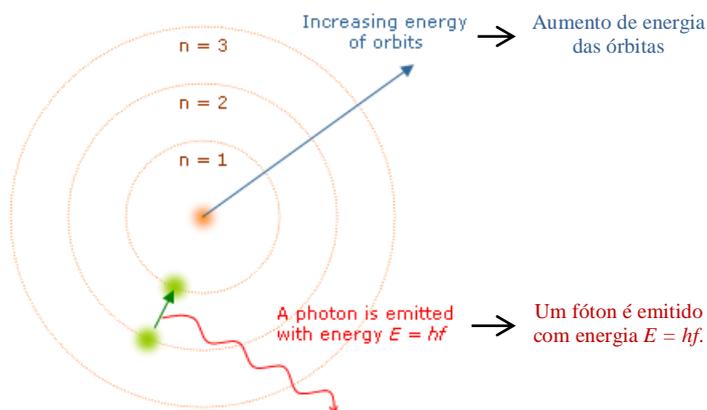


Figura 4: Modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio.
Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_at%C3%B4mico_de_Bohr.

Bohr sabia que seu modelo eram representações conceituais de um átomo. Embora sua teoria atômica tenha explicado satisfatoriamente o espectro de emissão do átomo de hidrogênio, o mesmo não aconteceu em relação a outros átomos; contudo, essa teoria preparou o caminho para a teoria atual. Com o desenvolvimento da Mecânica Quântica chegou-se a uma nova interpretação da natureza e da estrutura da matéria e a uma teoria moderna sobre o átomo, as quais prevalecem até os dias de hoje, mas não serão tratadas neste texto. As ideias de Bohr acerca de saltos quânticos e de as frequências da radiação serem proporcionais às diferenças de energia continuam fazendo parte da teoria atual do átomo.

A.1.1. O modelo atômico didático

O modelo atômico para fins didáticos é simplificado, apresentando somente a estrutura básica do átomo. Essencialmente o átomo é neutro, sendo constituído por um núcleo bastante pequeno com carga elétrica positiva, no qual está concentrada a maior parte da massa atômica. Ao redor do núcleo está a eletrosfera, formada por uma configuração de partículas denominadas *elétrons*, com cargas elétricas negativas. O núcleo atômico é composto por dois

tipos de partículas, denominadas *núcleons*²⁹: o *próton*, carregado positivamente, e o *nêutron*, que não tem carga elétrica.

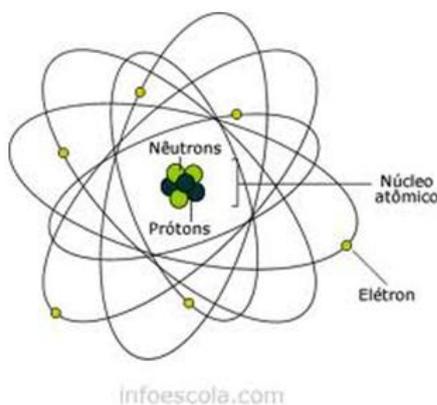


Figura 5: Modelo atômico didático.

Fonte: <http://www.cnen.gov.br/acnen/imagens/atomo.png>.

A maior parte do átomo é espaço vazio. Seu diâmetro é da ordem de 10^{-10} m e o núcleo tem cerca de 10^{-14} m. O núcleo é 10 mil vezes menor do que o átomo (10^{-4}), e definitivamente é muito pequeno, ocupando alguns quatrilionésimos do volume do átomo. A massa do nêutron é ligeiramente maior do que do próton, sendo estas respectivamente iguais a $m_n = 1,6750 \times 10^{-27}$ Kg e $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$ Kg. A massa do elétron é $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$ Kg, cerca de 1.840 vezes menor do que a do próton e do nêutron. O módulo das cargas elétricas do próton e elétron é igual à da carga elétrica elementar $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C. Assim, a carga do próton é dada por $e = +1,6 \times 10^{-19}$ C e, a do elétron, $e = -1,6 \times 10^{-19}$ C.

A.2. O NÚCLEO ATÔMICO

Como já mencionamos, o núcleo atômico é constituído por prótons carregados positivamente e por nêutrons, com carga elétrica nula; porém se pergunta: como é mantida a estabilidade nuclear? De acordo com o Princípio da Atração e Repulsão, sabe-se que cargas de igual sinal se repelem e, no núcleo, há somente cargas positivas que deveriam se afastar umas das outras em virtude da força de repulsão coulombiana.

²⁹ Cada núcleon, por sua vez, é constituído por três partículas elementares menores, denominadas *quarks*.

Na natureza existem quatro tipos de interações (ou forças) fundamentais. São elas: a interação gravitacional, a interação eletromagnética, a interação (nuclear) forte e a interação fraca. A força de interação forte, ou força nuclear, explica a estabilidade do núcleo, uma vez que atua entre os pares de núcleons: próton-próton (p-p), próton-nêutron (p-n) e nêutron-nêutron (n-n). A força nuclear é atrativa e mais intensa do que a força de repulsão coulombiana, mantendo os prótons e nêutrons coesos.

A força nuclear, que mantém os prótons e nêutrons fortemente unidos, é uma força de troca produzida por uma partícula elementar - o *méson*. Tal partícula faz um tipo de “jogo de bolas pendular”, oscilando entre prótons e nêutrons que se transformam constantemente um no outro. O *méson*, palavra de origem grega que significa troca, é também conhecido como *partícula de Yukawa*, em homenagem ao físico japonês que estabeleceu sua existência em 1935, ou ainda como *méson pi*. Sua massa é superior à do elétron e inferior à do próton. A primeira detecção experimental do *méson pi* foi realizada pelo físico brasileiro nascido em Curitiba, Cesar Lattes³⁰ (1924-2005), em conjunto com os pesquisadores Powel e Occhialini, em 1947. (FUCHS, 1972).

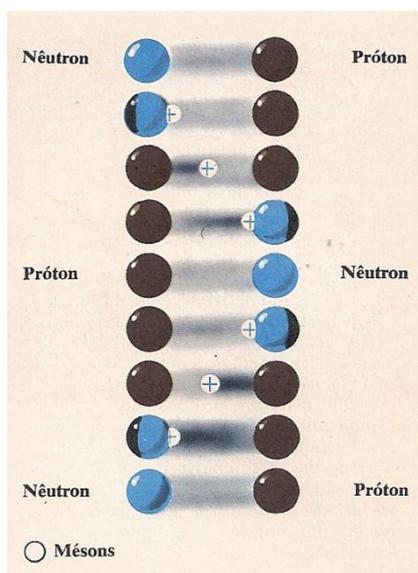


Figura 6: Ilustração da oscilação dos *mésons* entre prótons e nêutrons.
Fonte: Fuchs (1972, p. 255).

³⁰ Cesar Lattes é o nome pelo qual é mais conhecido, mas o nome correto do grande físico brasileiro é Césare Mansueto Giulio Lattes.

O átomo de um elemento químico é caracterizado pelo número de prótons no núcleo, denominado *número atômico* Z . Um elemento é uma substância quimicamente pura, formada por átomos de um único tipo, ou seja, por átomos cujos núcleos possuem o mesmo número de prótons. Por exemplo, o hidrogênio é o elemento natural mais simples, e seu número atômico é $Z = 1$, pois possui apenas 1 próton em seu núcleo. O urânio é o elemento natural mais complexo, com número atômico $Z = 92$, uma vez que possui 92 prótons em seu núcleo. Cada elemento químico recebe um nome e um símbolo que o identificam. Os diversos elementos, ao se combinarem em uma determinada proporção fixa, formam os compostos químicos.

O *número de massa* A é o número de prótons somado ao número de nêutrons no núcleo. Embora cada elemento químico tenha um número de prótons definido, o número de nêutrons pode variar; portanto o número de massa não é fixo para cada elemento.

Os elementos podem ser representados pela seguinte forma: A_ZX , onde A o número de massa, Z o número atômico e X o símbolo do elemento químico. Para um átomo neutro, o número de elétrons é igual ao número de prótons (carga total nula). O número de nêutrons (símbolo N) é obtido fazendo-se a diferença entre o número de massa e o número atômico: $N = A - Z$. Muitas vezes omite-se o número atômico, escrevendo-se apenas: AX , ou representa-se o símbolo seguido de um hífen e o número de massa do elemento químico: $X - A$. Por exemplo, podemos representar o elemento césio-137 das seguintes formas: ${}^{137}_{55}\text{Cs}$, ${}^{137}\text{Cs}$ e $\text{Cs}-137$.

Até o ano de 2008, 117 elementos químicos já tinham sido descobertos. Entre estes, 92 são naturais e 25 são produzidos artificialmente (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

A.3. ISÓTOPOS E RADIOISÓTOPOS

Os átomos de um mesmo elemento químico podem ter números diferentes de nêutrons, e a consequência imediata disto é que suas massas são distintas. Os *isótopos* são os átomos de um mesmo elemento químico que apresentam massas diferentes em virtude do número diferente de nêutrons em seus núcleos.

O hidrogênio - o elemento químico mais simples -, tem três isótopos: o hidrogênio comum, com somente um próton no núcleo (${}^1_1\text{H}$), o hidrogênio deutério possuindo um próton e um nêutron no núcleo (${}^2_1\text{H}$), e o hidrogênio trítio, que contém um próton e dois nêutrons no núcleo (${}^3_1\text{H}$). Todos possuem somente um elétron na eletrosfera (átomo neutro). Os isótopos

de elementos radioativos são também chamados de *radioisótopos*. O urânio natural - o elemento químico mais “pesado” - é constituído de uma mistura de três radioisótopos: o urânio-234 (92 prótons e 142 nêutrons), em quantidade desprezível em relação ao urânio natural; o urânio-235 (92 prótons e 143 nêutrons), em quantidade igual a 0,7% em relação ao urânio natural, e o urânio-238 (92 prótons e 146 nêutrons), cuja quantidade corresponde a 99,3% de uma amostra de urânio natural.

A utilização de aceleradores de partículas e de reatores nucleares tornou possível a produção artificial de radioisótopos em grande quantidade, principalmente os radiofármacos utilizados na medicina para aplicação em diagnose e tratamento de doenças (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

A.4. RADIOATIVIDADE: EMISSÕES ALFA, BETA E GAMA

Em 1896 Henri Becquerel investigava a relação entre os raios X e a fluorescência de compostos de urânio. Em dia de céu nublado guardou em uma gaveta, juntamente com filmes fotográficos, uma amostra de sal de urânio embalada em papel à prova de luz (papel preto). Após revelar os filmes, Becquerel observou que a amostra havia impressionado as chapas fotográficas (velado o filme), o que o levou a pensar que o urânio emitia alguma forma de energia ainda desconhecida. Os raios ficaram conhecidos como *raios de Becquerel*, ou *raios de urânio*. Mais tarde o fenômeno foi denominado de radioatividade.

Nos primeiros trinta anos do século passado, muitos pesquisadores estiveram envolvidos nos estudos da radioatividade; contudo, a compreensão da natureza do fenômeno só foi possível em virtude dos diversos experimentos realizados, principalmente pelo casal Marie e Pierre Curie e por Ernest Rutherford e seus colaboradores.

Os cientistas descobriram que a radioatividade apresenta algumas características, a saber: escurece filmes, ioniza gases, produz cintilações em determinados materiais, penetra na matéria, mata tecido vivo, libera grande quantidade de energia com pequena perda de massa e, especialmente, não é afetada por alterações químicas e físicas no material emissor. Supunha-se que a radioatividade tivesse origem atômica, e como ela não era afetada por alterações químicas, então não deveria ser associada aos elétrons. Com isso, os cientistas chegaram à conclusão de que a radioatividade tinha origem no núcleo do átomo, constituindo-se assim, numa radiação nuclear. (BRASIL, 1984; MURA; LOPES, 1985).

O experimento que mais revela o comportamento da radioatividade é aquele em que a radiação de uma amostra de material radioativo passa por um campo elétrico muito intenso, produzido por duas placas eletricamente carregadas. Observa-se que o feixe inicial é dividido em três radiações distintas. A deflexão em direção à placa carregada positivamente indica que o feixe é composto por partículas de natureza negativa, ao passo que a deflexão na direção da placa negativa indica um feixe composto por partículas positivas. O feixe que segue sua trajetória sem desvio não sofre ação do campo elétrico, logo, não tem carga elétrica.

Como no início do século XX ainda não se conhecia a natureza dessas radiações, elas foram denominadas de *raios alfa*, *raios beta* e *raios gama*, que constituem as três formas de radiação nuclear. Após esses estudos, descobriu-se que os raios alfa e beta são partículas providas de carga elétrica e os raios gama são radiações eletromagnéticas (sem carga elétrica).

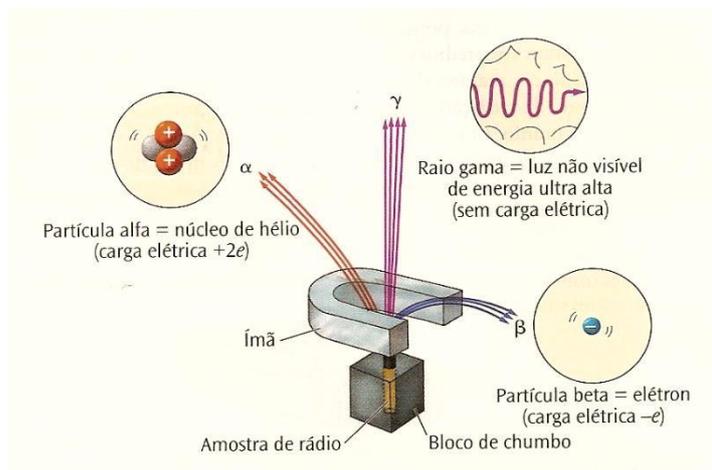


Figura 7: Representação do arranjo experimental para detecção das três radiações nucleares α , β e γ , emitidas por uma amostra de material radioativo. Fonte: Hewitt (2011, p. 585).

As radiações alfa, ou partículas alfa (α), são aquelas que têm carga elétrica positiva. São formadas por núcleos do átomo de hélio, os quais possuem dois prótons e dois nêutrons (${}^4_2\text{He}$). Os raios beta, ou partículas beta (β), são aqueles que possuem carga elétrica negativa, e são constituídos por elétrons. A radiação gama é simplesmente a radiação eletromagnética, formada por um feixe de fótons (sem carga elétrica). Assim, as radiações alfa e beta são projéteis providos de massa e carga elétrica, enquanto a radiação gama é constituída de ondas eletromagnéticas.

A.4.1. Afinal, o que é radioatividade?

O que é radiação e, mais especificamente, o que é radioatividade?

Radiação é a emissão ou a propagação de energia independentemente do meio. É energia em trânsito. É uma forma de energia emitida por uma fonte e transmitida através do vácuo, do ar ou de meios materiais (FARIA, 1989; OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Existem dois tipos de radiação (classificação quanto à massa): a corpuscular e a eletromagnética. Consideram-se radiações corpusculares aquelas formadas por partículas subatômicas energéticas, tais como partículas alfa, elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons, etc. A radiação eletromagnética é também conhecida como radiação ondulatória ou radiação eletromagnética, ou ainda, como energia radiante. São radiações que se propagam na forma de ondas eletromagnéticas (sem partículas), tais como a luz, as ondas de rádio, televisão, radar, os raios infravermelhos, os raios ultravioleta, os raios X e os raios gama.

Podemos, então, afirmar que a radioatividade é a transmissão de *radiação nuclear*, ou *emissão de energia nuclear*; ou ainda, definir a radioatividade como *energia nuclear em trânsito*. É um processo que ocorre em núcleos atômicos e que resulta na emissão de partículas subatômicas energéticas ou ondas eletromagnéticas.

A radiação que possui energia suficiente para arrancar um elétron de um átomo ou de uma molécula é denominada *radiação ionizante*. Se um elétron é ejetado do átomo, forma-se um par de íons - um íon positivo (o que restou do átomo anterior) e um íon negativo (elétron ejetado) -. Assim, a passagem de uma radiação ionizante por um meio produz ionização nesse meio através da retirada de elétrons dos átomos do material. Os raios X e os raios gama são radiações eletromagnéticas ionizantes, enquanto as partículas alfa e as partículas beta são radiações corpusculares ionizantes.

A.4.2. Diferenças básicas entre os raios X e as radiações nucleares

As diferenças entre as radiações nucleares (emissões alfa, beta e gama) e os raios X são basicamente as seguintes: i) as radiações alfa, beta e gama têm origem no núcleo de elementos radioativos, enquanto os raios X não têm origem nuclear, mas sim, na nuvem eletrônica em volta do núcleo; ii) as radiações alfa, beta e gama são emitidas espontaneamente por núcleos atômicos instáveis, enquanto os raios X são produzidos artificialmente pelo

homem quando elétrons livres rápidos são lançados contra materiais, parte de sua energia ou toda ela é convertida em fótons de raios X na frenagem (radiação de frenamento). Assim, a radiação de raio X cessa quando a máquina é desligada da rede elétrica, enquanto que é impossível impedir a emissão de radiação nuclear.

Embora os raios X e os raios gama sejam de natureza eletromagnética, os raios gama têm comprimento de onda menor e frequência maior, portanto são mais energéticos.

A.5. DECAIMENTO RADIOATIVO

Os elementos químicos podem ter núcleos atômicos estáveis ou instáveis. Os núcleos leves estáveis têm o mesmo número de prótons e de nêutrons. A estabilidade nuclear é ditada pelo equilíbrio entre as forças nucleares, que agem entre os pares de prótons e nêutrons, e a força de repulsão coulombiana, que age entre os prótons.

À medida que o número atômico Z cresce, o número de nêutrons torna-se maior do que o de prótons para manter o núcleo coeso. Isso ocorre porque a força coulombiana de repulsão entre prótons vai aumentando de intensidade, podendo causar o rompimento do núcleo. Desse modo, são necessários mais nêutrons, pois estes experimentam somente a força nuclear atrativa. Como o número atômico Z vai aumentando, o núcleo se torna instável. Os elementos radioativos são aqueles que possuem núcleos instáveis, em virtude do excesso de partículas ou de carga elétrica. Tais núcleos são altamente energéticos e tendem a se estabilizar emitindo espontaneamente partículas e energia.

De acordo com Cardoso [200-b], um dos processos de estabilização é aquele em que o núcleo radioativo, com excesso de energia, procura se estabilizar emitindo espontaneamente uma *partícula alfa* (α), composta por dois prótons e dois nêutrons, ou seja, por um núcleo do átomo de hélio (${}^4_2\text{He}$). Tais núcleos têm número atômico $Z \geq 83$. É importante observar que toda vez que um núcleo ejeta uma partícula alfa, o número de massa do núcleo resultante diminui em quatro unidades de massa ($A - 4$), enquanto o número atômico diminui em duas unidades ($Z - 2$).



Figura 8: Representação da emissão alfa por um núcleo radioativo.
Fonte: Hewitt (2011, p. 592).

Quando existe excesso de nêutrons em relação ao número de prótons, o núcleo tende a se estabilizar emitindo uma partícula beta negativa (β^-), ou simplesmente partícula beta (β). Tal partícula é um elétron resultante da conversão de um nêutron em um próton. Embora o número de massa do núcleo resultante não seja alterado pela perda do elétron, o número atômico aumenta em uma unidade ($Z + 1$).

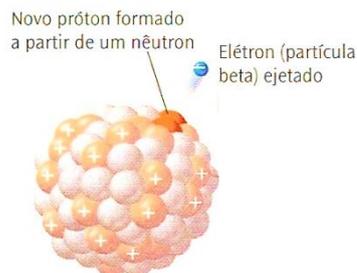


Figura 9: Ilustração da emissão de uma partícula beta negativa (ejeção de um elétron).
Fonte: Hewitt (2011, p. 592).

Pergunta-se aqui: como é possível um nêutron se converter em um próton e emitir um elétron? Para explicar o decaimento (β), o físico italiano Enrico Fermi propôs, em 1933, a existência de uma nova força da natureza – a interação nuclear fraca ou força nuclear fraca -, que ocorre no interior do núcleo atômico. Como forma de manter a teoria coerente com as leis de conservação de energia e da quantidade de movimento, Fermi sugeriu a existência de uma partícula leve e neutra, que chamou de neutrino (significa “pequeno nêutron” em italiano). O neutrino já havia sido previsto por Wolfgang Pauli e só foi detectado em meados da década de 1950. Os neutrinos participam da interação nuclear fraca, que é responsável pelo decaimento beta.

Caso exista um excesso de prótons em relação ao número de nêutrons, o núcleo ejeta uma partícula beta positiva (β^+) denominada *pósitron*, resultante da conversão de um próton em um nêutron. Neste caso, o número atômico do núcleo resultante diminui em uma unidade ($Z - 1$). O pósitron é a antipartícula do elétron - é idêntico ao elétron, com exceção da carga, que é positiva.

Assim, a radiação beta é a emissão espontânea de um elétron negativo de origem nuclear ou de um pósitron (elétron positivo) por um núcleo atômico instável.

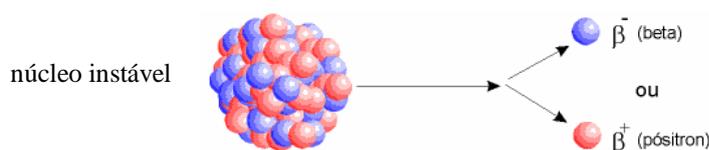
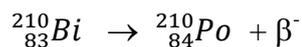
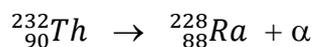


Figura 10: Representação da emissão beta por um núcleo radioativo.

Fonte: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>.

Quando um elemento radioativo emite partículas alfa ou beta, varia o número de prótons no núcleo (diminui ou aumenta), ocorrendo uma alteração do número atômico. Com isso, o elemento químico se transforma ou se transmuta, e um novo elemento químico é formado. A transformação de um núcleo atômico em outro em virtude da emissão espontânea de partículas nucleares é conhecida como *decaimento radioativo* ou *transmutação nuclear*. É um processo natural, mas pode ser produzido artificialmente em laboratórios.

Apresentamos como exemplos a equação de transmutação do tório-232 em rádio-228 ao emitir uma partícula alfa (α) e a do bismuto-210 em polônio-210 ao emitir uma partícula beta negativa (β^-):



No decaimento do tório-232, o número atômico do núcleo resultante (${}_{88}^{228}\text{Ra}$) diminui em duas unidades ($Z = 90 - 2$) e o número de massa em quatro unidades ($A = 232 - 4$), uma vez que a partícula alfa emitida é um núcleo de hélio (${}^4_2\text{He}$). Ao decair, o tório-232 não existe mais, e sim, o elemento químico rádio-228.

O bismuto-210, ao decair, emite uma partícula beta. Como a partícula beta é um elétron resultante da conversão de um nêutron em um próton, o número atômico do núcleo filho (${}^{210}_{84}\text{Po}$) aumenta em uma unidade ($Z = 83 + 1$), mas o número de massa não se altera ($A = 210$). O bismuto-210 deixa de existir logo que se transmuta em polônio-210.

O termo *desintegração nuclear* também é utilizado, porém não é adequado, porque dá a ideia de desintegração total do átomo, e não de perda de sua integridade. Podemos, então, dizer que um núcleo instável decai, ao passo que um núcleo estável não decai.

Após a emissão das partículas alfa e beta, o núcleo resultante que ainda permanece com excesso de energia procura se estabilizar e emite um fóton, ou radiação eletromagnética, denominada radiação gama (γ). Nesse caso, o núcleo não sofre transmutação, uma vez que não houve emissão de partículas (CARDOSO, 200-b).

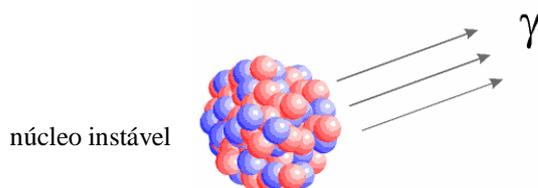
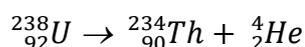


Figura 11: Representação da emissão gama por um núcleo radioativo.
Fonte: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>.

A Teoria das Transformações Radioativas foi apresentada por Ernest Rutherford e Frederic Soddy entre 1902 e 1903. Para entendermos melhor o decaimento radioativo, consideremos o urânio-238, cujo núcleo possui 92 prótons e 146 nêutrons (${}^{238}_{92}\text{U}$). Quando uma partícula alfa (núcleo do átomo de ${}^4_2\text{He}$) é emitida, o núcleo de urânio-238 perde dois prótons e dois nêutrons. Como um elemento químico é identificado pelo número de prótons no núcleo (número atômico Z), os 90 prótons e os 144 nêutrons que restaram não constituem mais o urânio-238. Ocorreu, então, a transmutação nuclear, e o átomo de urânio-238 não existe mais, surgindo assim um novo elemento químico, o tório-234 (${}^{234}_{90}\text{Th}$). Tal decaimento pode ser representado pela seguinte equação:



Costuma-se denominar de *núcleo pai* aquele que decai (o urânio-238, por exemplo) e de *núcleo filho* o produto do decaimento (o tório-234). Na equação demonstrada, os números

de massa dos produtos obtidos ($234+4$) e os números atômicos ($90+2$) se equilibram. Durante a transmutação, a energia é liberada de três formas: parcialmente como energia cinética da partícula alfa (${}^4_2\text{He}$) e como energia cinética do núcleo de tório-234, e parcialmente, na forma de radiação gama. O tório obtido desse decaimento também é radioativo e sofre transmutação, produzindo outro elemento químico e liberando energia (HEWITT, 2011).

Rutherford foi o primeiro cientista que conseguiu, em 1919, produzir artificialmente a transmutação de um elemento químico, ao bombardear nitrogênio gasoso com partículas alfa emitidas de um material radioativo. Nesse processo, foi obtido o oxigênio e ocorreu liberação de prótons (HEWITT, 2011). Rutherford realizou a transmutação de outros núcleos atômicos pelo mesmo processo. Em 1934, Irène Curie, filha de Marie e Pierre Curie, e seu marido Frédéric Joliot, descobriram a radioatividade artificial, ao produzirem, pela primeira vez, os elementos radioativos fósforo-30 (${}^{30}_{15}\text{P}$) e nitrogênio-13 (${}^{13}_7\text{N}$). O casal Curie-Joliot também demonstrou que elementos químicos leves, mesmo os mais estáveis, podem se tornar radioativos (SAFFIOTI, 1982). Desde então, pesquisadores têm realizado a transmutação atômica artificial, com o intuito de produzir elementos químicos sintéticos até então desconhecidos.

Todos os elementos químicos naturais ou artificiais, com número atômico $Z > 82$, são radioativos naturalmente e se desintegram sucessivamente passando de um núcleo a outro até se transformarem em um isótopo estável de chumbo (Pb), com número atômico $Z = 82$, que é o final da radiação natural.

A.5.1. Poder de penetração da radiação na matéria

Os estudos realizados por Rutherford e colaboradores mostraram que cada tipo de radiação percorria uma distância máxima no ar até parar. Essa distância é denominada *alcance* (válido somente para radiações corpusculares). Ao realizarem experimentos para barrar diferentes tipos de radiação, os pesquisadores também observaram que as radiações não tinham o mesmo poder de penetração na matéria.

As partículas alfa são as que têm maior massa (dois prótons e dois nêutrons), e, em virtude de sua grande massa (quando comparada à massa do elétron, que é tomado como referência), o poder de penetração na matéria é pequeno e elas não conseguem atravessar mais do que alguns centésimos de milímetro na matéria. Possui trajetória praticamente retilínea em

um meio. Uma lâmina de alumínio com 0,66 mm de espessura ou uma folha de papel, já é suficiente para interceptá-las, inclusive a própria pele humana. O alcance é cerca de 7 cm no ar. Por outro lado, por possuírem carga elétrica $+2e$, as partículas alfa são as mais ionizantes. Por exemplo, quando é bombardeado por partículas alfa, um gás torna-se ionizado e, conseqüentemente, transforma-se em um condutor de eletricidade. Porém, a ingestão ou a inalação de radionuclídeos emissores de partículas alfa pode causar sérios danos ao ser humano, uma vez que essas partículas produzem alta densidade de ionização. (CARDOSO, 2003; PIETROCOLA et al., 2010; OKUNO, 2007).

A maior parte das partículas beta são elétrons de origem nuclear. O seu poder de penetração é maior, cerca de 50 a 100 vezes maior do que o das partículas alfa, conseguindo penetrar até 16 mm na madeira. No corpo humano, podem penetrar até 2,0 cm e causar sérios danos. São barradas por lâminas de alumínio com 1,0 cm de espessura ou por lâminas de chumbo. O alcance é de alguns metros no ar e a capacidade de ionização de um meio por essas partículas é bem menor do que a das partículas alfa, em decorrência de sua pequena massa. (PIETROCOLA et al., 2010; SAFFIOTI, 1982).

Os raios gama, como também os raios X, têm capacidade de ionização baixa em comparação com as partículas alfa e beta. Em virtude da natureza ondulatória e da ausência de carga elétrica, os raios gama são muito mais penetrantes do que as partículas alfa e beta. São capazes de atravessar dezenas de metros no ar, até 25 cm na madeira e 15 cm no aço. Podem atravessar completamente o corpo humano e causar sérios danos. É possível barrar a radiação gama por meio de placas de chumbo ou por grossas camadas de concreto ou terra. (PIETROCOLA et al., 2010; SAFFIOTI, 1982).

A.6. MEIA-VIDA RADIOATIVA

Denomina-se *atividade* de uma amostra radioativa o número de decaimentos por unidade de tempo. A medida original era dada em *curie* (*Ci*), em homenagem a Marie Curie, e não pertencia ao Sistema Internacional de Unidades (SI). O curie foi definido como o número de decaimentos por segundo de uma amostra de um grama de rádio-226. Assim:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ decaimentos/s} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

O curie foi substituído pela medida *becquerel* (*Bq*), em homenagem a Henri Becquerel, do Sistema Internacional. Assim, a unidade de atividade no SI é dada por:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimento/s ou } 1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$
$$(1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq})$$

Conforme mencionamos, um elemento radioativo emite continuamente radiação na tentativa de alcançar uma situação de estabilidade. Assim, durante os sucessivos decaimentos a atividade de uma amostra vai decrescendo, até atingir um valor insignificante e o núcleo se estabiliza.

A *meia-vida* ($T_{1/2}$) é a medida do tempo necessário para que a atividade de metade dos átomos de uma amostra radioativa sofra decaimento. O céσιο-137, por exemplo, tem meia-vida de 30 anos. Isto significa que a atividade de uma pastilha de céσιο-137 cai para a metade após 30 anos, ou seja, decorrido esse tempo, metade da amostra (50%) terá decaído. O processo continua e, nos próximos 30 anos, metade da amostra remanescente decairá, restando somente um quarto (25%) da amostra original. Passados mais 30 anos, haverá um oitavo (12,5%) e, assim, sucessivamente.

Neste processo de decaimentos sucessivos, o núcleo-pai *A* decai, resultando em um núcleo-filho *B*, e este, por sua vez, decai em um núcleo-neto *C*, até atingir uma configuração de equilíbrio. Os decaimentos acontecem por várias gerações e constituem o que se chama de *séries radioativas* ou *famílias radioativas* naturais (Anexo A). Existem apenas três séries radioativas naturais: série do urânio, série do actíneo e série do tório. A série do actíneo tem esse nome porque se pensava que iniciava com o actíneo-227, mas na realidade começa com o urânio-235. Todas terminam em isótopos estáveis de chumbo (Pb).

O decaimento de uma amostra radioativa ocorre, matematicamente, de forma exponencial, de acordo com a Lei do Decaimento Radioativo, dada pela seguinte equação:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

em que:

N é o número de átomos presentes no instante t ; N_0 é o número de átomos no início da contagem ($t = 0$) da atividade de uma amostra; λ é a constante de decaimento dada por $\lambda = 1/T$, onde T é a meia-vida do elemento radioativo.

O gráfico da figura 12 mostra a curva de um decaimento radioativo. Note-se que $N_0/2$ corresponde à metade dos átomos de uma amostra após o decaimento radioativo durante o tempo de uma meia-vida T .

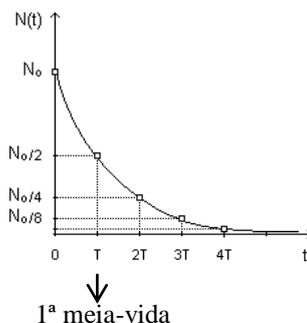


Figura 12: Curva representativa de decaimento radioativo.

Podemos representar, também, o processo de decaimento de uma amostra radioativa por meio de uma segunda expressão matemática, que é dada por:

$$M = M_0/2^x$$

em que:

M é a massa final da amostra; M_0 é a massa no início da contagem do tempo ($t = 0$) da atividade da amostra e x é o número de meias-vidas contado em um período especificado.

Por exemplo, se tomarmos 100 gramas de uma amostra radioativa, após um intervalo de tempo de uma meia-vida ($x = 1$) apenas 50 gramas do material continuarão a emitir radiação. Passado um período de duas meias-vidas ($x = 2$), 25 gramas da amostra continuarão emitindo radiação, e, assim, sucessivamente.

Há radioisótopos naturais que possuem meia-vida longa, de bilhões de anos, enquanto outros têm meias-vidas de apenas alguns milionésimos de segundo. Por exemplo, o urânio-238 tem meia-vida de 4,5 bilhões de anos e o polônio-214, de $1,6 \times 10^{-4}$ segundo. Quanto menor for a meia-vida de um radioisótopo, maior será a sua atividade e, portanto, maior será o número de decaimentos nucleares na unidade de tempo.

De acordo com Okuno e Yoshimura (2010), até o ano de 1925 eram conhecidos 88 elementos químicos naturais, cujos números atômicos começavam em $Z = 1$ (hidrogênio) e iam até $Z = 92$ (urânio). Não obstante, faltavam quatro elementos para completar a Tabela Periódica. Com a utilização de técnicas de transmutação atômica artificial, primeiro a do

bombardeamento de átomos com partículas (partículas alfa, dêuterons, prótons, etc.) provenientes de cíclotons e, depois, com nêutrons projetados de reatores nucleares de fissão, foi possível criar esses elementos em laboratório. Todos eles têm meias-vidas curtas e, por isso, ou decaíram e desapareceram da Terra, ou existiam em quantidades diminutas, o que explica a dificuldade em encontrá-los na natureza. Os quatro elementos que faltavam são: o Tecnécio-99 ($Z = 43$), descoberto em 1937, de meia-vida de 6,02 horas; o Frâncio-223 ($Z = 87$), com vida-vida de 22 minutos, identificado em 1939; o Astató ($Z = 85$), descoberto em 1940, é o elemento mais raro do mundo, sendo o Astató-219 o isótopo desse elemento químico com meia-vida mais longa (56 segundos); por fim, o Promécio ($Z = 61$), produzido em 1945, cujo isótopo mais estável tem meia-vida de 17,7 anos. A tabela periódica com os 92 elementos naturais³¹ foi completada em 1945.

A partir da década de 1940 a tecnologia de fusão nuclear permitiu que cientistas produzissem artificialmente elementos químicos com número atômico Z cada vez maior, chamados de transurânicos. O número atômico desses elementos está compreendido entre 93 e 118. Em geral, os elementos artificiais têm meias-vidas muito curtas, contudo há isótopos de plutônio com meia-vida longa, como a do plutônio-239, de 24.300 anos.

A tabela 1 apresenta a meia-vida de alguns radioisótopos muito usados em medicina:

Tabela 1: Meia-vida de alguns radioisótopos usados na medicina.

Césio-137 (^{137}Cs)	30 anos
Estrôncio-90 (^{90}Sr)	28,2 anos
Cobalto-60 (^{60}Co)	5,26 anos
Írídio-192 (^{192}Ir)	73,8 dias
Iodo-131 (^{131}I)	8 dias
Iodo-123 (^{123}I)	8 dias
Ouro-198 (^{198}Au)	2,7 dias
Tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	6 horas

Fonte: Okuno e Yoshimura (2010, p. 256).

³¹ Os elementos químicos tecnécio ($Z = 43$) e promécio ($Z = 61$) não existem na superfície da Terra e só podem ser produzidos artificialmente por meio das técnicas de transmutação artificial. Outros sete elementos – polônio ($Z = 84$), astató ($Z = 85$), radônio ($Z = 86$), frâncio ($Z = 87$), rádio ($Z = 88$), actínio ($Z = 89$) e protactínio ($Z = 91$) - existem em quantidades diminutas na natureza como produtos de decaimento radioativo (SAFFIOTI, 1982).

Os radioisótopos utilizados nos exames diagnósticos e no tratamento de doenças são chamados de radiofármacos. De acordo com Gonçalves Filho e Toscano (2011), quando um hospital ou clínica adquire um radiofármaco, deve haver um bom planejamento para que o material seja bem utilizado, em virtude de sua meia-vida ser curta e de ser alto o custo de produção. Por exemplo, o samário-153 (meia-vida de 46 horas), associado ao fosfonado, é utilizado para aliviar a dor nos pacientes com câncer ósseo. Após 46 horas o samário-153 não produz mais o mesmo alívio nos pacientes. O iodo-131, na forma de iodeto de sódio, é utilizado no tratamento de tumores da tireoide. Após oito dias o iodo perde metade de sua atividade e o efeito produzido no paciente não é mais o desejável, daí a importância do bom planejamento na utilização de medicamentos radiofármacos.

A.7. FISSÃO NUCLEAR: O NÚCLEO ATÔMICO É QUEBRADO

A fissão nuclear é o processo pelo qual um núcleo atômico instável se divide em dois núcleos menores, com liberação de muita energia. A reação nuclear é provocada bombardeando-se o núcleo-alvo com partículas subatômicas (geralmente o nêutron). Após capturar a partícula subatômica, o núcleo-alvo se torna altamente instável e se “quebra” em dois núcleos menores, emitindo grande quantidade de energia. Em princípio, qualquer núcleo pode sofrer fissão, porém o processo é mais facilmente realizável nos núcleos pesados, normalmente instáveis, como o urânio, o tório, o plutônio e outros (OLIVEIRA, 2005).

Em todos os núcleos encontrados na natureza as forças nucleares são mais intensas do que as forças coulombianas de repulsão, mas nos radioisótopos o domínio da força nuclear é tênue. Por exemplo, quando um núcleo de urânio-235 é bombardeado com um nêutron, forma-se um núcleo muito instável de urânio-236. O nêutron absorvido atua como agente perturbador da estabilidade e do equilíbrio das forças de coesão nucleares. O excesso de nêutrons provoca uma deformação no núcleo, que, originalmente esférico, começa a adquirir uma forma alongada de haltere. Com isso as forças nucleares vão enfraquecendo e as coulombianas vão se intensificando. Quando a deformação adquire uma situação crítica, a força mais intensa passa a ser a força elétrica de repulsão (repulsão coulombiana) e, nesse momento, ocorre o rompimento definitivo do núcleo e a formação de dois núcleos independentes. (HEWITT, 2011; SAFFIOTI, 1982).

O esquema da figura 13 representa o processo evolutivo da fissão nuclear do urânio-235.

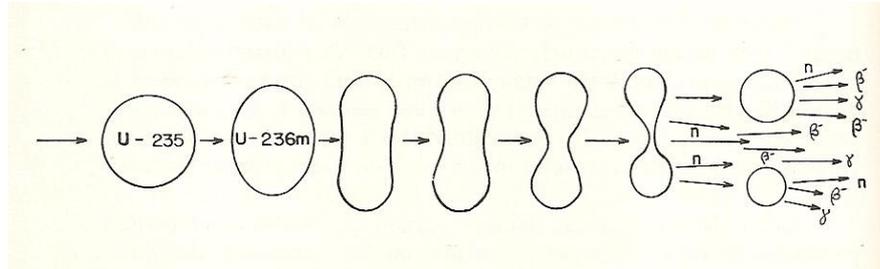


Figura 13: Representação do processo evolutivo da fissão nuclear do U-235, de acordo com o modelo da gota líquida.
Fonte: Saffioti (1982, p. 110).

No exemplo típico da fissão do urânio-235, a energia que mantém o núcleo unido é liberada, na maior parte, em forma de calor. Além dos dois núcleos menores que se formam, há a liberação de dois ou três nêutrons. Desse modo, o número médio de nêutrons ejetados na fissão do urânio-235 é de, aproximadamente, 2,4 por desintegração.

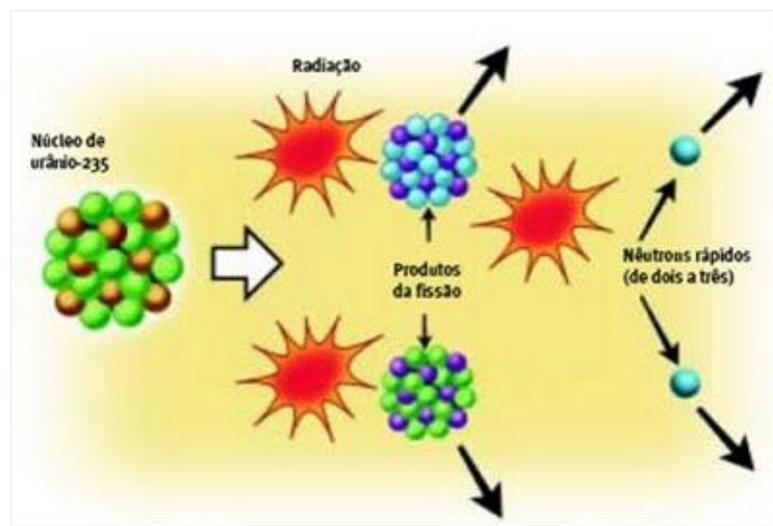
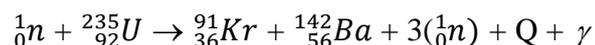


Figura 14: Representação da fissão do urânio-235.
Fonte: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf.

Na quebra do urânio-235 representada abaixo são liberados um núcleo de criptônio-91, um núcleo de bário-142, três nêutrons, calor e radiação:



Segundo Hewitt (2011), em um processo de fissão a massa dos fragmentos produzidos mais a dos nêutrons ejetados é menor do que a massa do núcleo original fissionado. A pequena diferença de massa que falta é convertida em grande quantidade de energia durante a reação, obedecendo à famosa equação de Einstein: $E = mc^2$. A energia liberada na fissão encontra-se principalmente na forma de energia cinética dos núcleos menores produzidos no processo, os quais se afastam uns dos outros e dos nêutrons ejetados a altas velocidades, e na forma de radiação gama. De acordo com Terremoto (2004), no caso do urânio-235, a energia liberada na fissão de um núcleo é de $3,2 \times 10^{-11}$ J e na fissão completa de 1 kg é de $8,21 \times 10^{13}$ J, cerca de 2×10^{10} kcal. Essa imensa quantidade de energia liberada equivale à explosão de 20.000 toneladas de trinitrotolueno (TNT).

O processo de fissão pode produzir muitas combinações diferentes de núcleos menores. Quando uma população muito grande de átomos de urânio sofre fissão provocada por nêutrons, formam-se inicialmente mais de 200 isótopos radioativos. Dentre estes, cerca de 30 têm meias-vidas muito curtas. Esses radioisótopos apresentam massa atômica entre 72 e 160 e tendem a se estabilizar emitindo partículas beta, raios gama, neutrinos e, em alguns casos, até nêutrons.

A.7.1. Núcleos físseis e núcleos férteis

Os isótopos de urânio-235, urânio-233 e plutônio-239 são chamados de *núcleos físseis*, pois sofrem o processo de fissão nuclear pelo bombardeamento de nêutrons. Os núcleos chamados de *férteis* são aqueles que não sofrem fissão ao capturarem um nêutron, mas se transformam em novos elementos (transmutam). É o caso do urânio-238 e do tório-232 (SAFFIOTI, 1982).

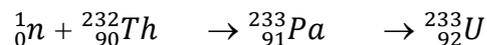
O esquema a seguir representa o bombardeamento do urânio-238 por um nêutron energético, obtendo-se no final o núcleo transurânico denominado de plutônio-239.



Ao capturar o nêutron, o núcleo de urânio-238 não sofre fissão, e sim, transforma-se no instável urânio-239. Em cerca de meia hora o urânio-239 emite uma partícula β^- e um neutrino, e se transforma em um novo elemento - o netúnio-239 -, o primeiro elemento artificial com número atômico maior do que o do urânio. O netúnio-239 tem meia-vida de apenas 2,3 dias e, por sua vez, emite uma partícula β^- e um neutrino, transformando-se em plutônio-239; portanto, o plutônio-239 é um produto da transmutação espontânea do netúnio-239.

O plutônio é o segundo elemento transurânico a ser descoberto, com meia-vida de aproximadamente 23.000 anos. Vale observar que, enquanto a separação do urânio-235 do urânio metálico puro é um processo difícil, a separação do plutônio-239 a partir do urânio metálico é um processo relativamente fácil, em virtude de suas propriedades químicas. O plutônio é radioativamente tóxico, mais do que o urânio e menos do que o rádio. Emite partículas alfa altamente energéticas, capazes de matar células. Embora o plutônio seja classificado como uma substância que causa relativamente pouco câncer (células mortas não causam câncer, mas sim, células danificadas), o perigo está em seu uso como combustível de bombas atômicas. (HEWITT, 2011).

O urânio-233 é obtido artificialmente bombardeando-se o tório-232 com nêutrons. O tório-232, que não sofre fissão, captura um nêutron e emite uma partícula β^- , transformando-se no instável protactíneo-233, cuja meia-vida é de 27 dias. O protactíneo-233 emite, então, uma partícula β^- e se transforma em urânio-233, cuja meia-vida é cerca de 100.000 anos (SAFFIOTI, 1982).



A.8. A REAÇÃO EM CADEIA

A grande liberação de energia na fissão nuclear tornou esse processo uma fonte de energia formidável. Como os nêutrons não têm carga elétrica, aqueles liberados na fissão do primeiro núcleo não são repelidos pelos núcleos vizinhos. Os nêutrons ejetados incidem, então, em outros núcleos da amostra, causando a fissão de outros átomos e liberando mais nêutrons. Desse modo, a fissão é iniciada e sustentada por nêutrons. Essa sequência de fissões autossustentadas é conhecida como *reação em cadeia*. (HEWITT, 2011).

Em um processo de fissão típico do urânio-235, são ejetados dois ou três nêutrons. Esses novos nêutrons causam a fissão de dois ou três átomos, liberando mais energia, mais quatro ou nove nêutrons adicionais. Desse modo, ocorre uma sucessão de fissões com grande liberação de calor, radiação gama e radioisótopos, em que os produtos de uma reação estimulam novas reações.

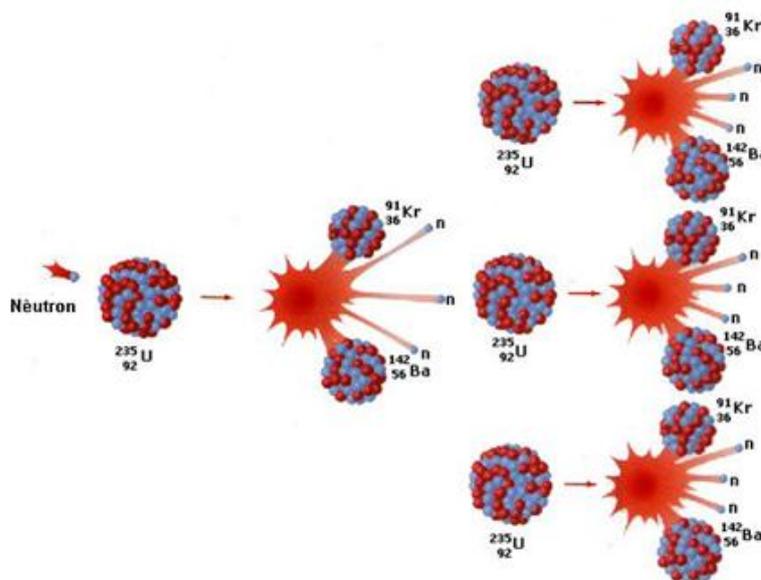


Figura 15: Representação da reação em cadeia do urânio-235.

Fonte: <http://www.mundoeducacao.com.br/upload/conteudo/images/fissao-nuclear.jpg>.

O urânio é um metal que se encontra incrustado nas rochas naturais e contém impurezas que impedem que sofra, naturalmente, o processo de fissão. Por exemplo, uma tonelada de granito comum contém cerca de 9 gramas de urânio e 20 gramas de tório; uma tonelada de basalto contém 3,5 gramas de urânio e 7,7 gramas de tório (HEWITT, 2011). A fissão ocorre principalmente com o isótopo de urânio-235, que corresponde a apenas 0,7% de uma amostra de urânio metálico puro. O isótopo mais abundante, o urânio-238 (99,3% do urânio puro), não sofre fissão, mas absorve os nêutrons rápidos liberados pelo urânio-235. Então, qualquer processo de fissão que possa ocorrer no urânio metálico puro, ou com aquele embebido nas rochas, é completamente anulado pelo U-238, impossibilitando a reação em cadeia espontânea.

A.9. A ENERGIA POR FISSÃO NUCLEAR: O REATOR DE FISSÃO E A BOMBA ATÔMICA

A energia por fissão nuclear foi apresentada ao mundo quando as bombas atômicas foram lançadas nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, no fim da Segunda Guerra Mundial; porém não demorou muito para que o grande potencial da energia nuclear fosse utilizado para a geração de energia elétrica, como também para pesquisa. Na década de 1950 foram construídos os primeiros reatores de fissão (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005).

Tanto a bomba atômica quanto um reator de fissão operam segundo o mesmo princípio: a reação em cadeia; contudo, esses dispositivos se diferenciam na forma de como se processar a reação, conforme apresentamos a seguir.

A.9.1. O reator de fissão: reação em cadeia autossustentada

Os reatores de fissão empregados nas usinas atômicas produzem a reação em cadeia autossustentada, uma vez que a taxa de reação é controlada. Para que uma reação em cadeia seja autossustentada, é necessário que pelo menos um dos nêutrons ejetados na fissão do núcleo de urânio-235 seja capturado por outro núcleo de urânio-235 e provoque a fissão deste último. Assim, uma vez iniciada e continuada a reação em cadeia, estabelece-se um equilíbrio, mantendo-se a taxa de reação desejada.

Vimos que na fissão urânio-235 são ejetados de dois a três nêutrons (média de 2,4) por reação. Na prática essa média é bem menor, uma vez que nêutrons muito energéticos escapam da região onde há núcleos fissionáveis de urânio-235 ou núcleos que são capturados por núcleos não fissionáveis de urânio-238. Assim, para tornar possível a reação em cadeia autossustentada é necessário *moderar* os nêutrons energéticos ejetados na fissão do urânio-235, até que se transformem em nêutrons mais lentos (a energia cinética corresponde à energia térmica ambiente): desse modo, o número de fissões aumenta e o número de capturas pelo urânio-238 diminui. Usa-se, então, um material *moderador* constituído por núcleos leves (geralmente água, água pesada ou grafite), o que permite ao reator trabalhar somente com o fluxo de nêutrons necessário para manter a taxa de reação constante. O processo ocorre de forma que, quando um nêutron energético é liberado na fissão do urânio-235 e colide com um núcleo leve, perde consideravelmente velocidade e energia cinética. Diz-se, então, que o

nêutron energético, com energia cinética média de 2 MeV, transformou-se em um nêutron térmico (lento), com energia cinética média de 0,025 eV, o que favorece uma nova fissão e garante a reação autossustentada. (HEWITT, 2011; SAFFIOTI, 1982; TERREMOTO, 2004).

Um bom moderador deve apresentar determinadas características, como o poder de moderação e a razão de moderação. A água pesada (D_2O – hidrogênio deutério) é considerada um dos melhores moderadores e a água comum (H_2O) um dos menos efetivos. A água pesada é muito cara, por isso é usada apenas nas aplicações especiais. O berílio (Be) também é um bom moderador, mas é caro e raramente utilizado. A água e o grafite são os moderadores mais usados, uma vez que oferecem uma relação satisfatória entre o poder de moderação e o custo (TERREMOTO, 2004).

O *fator de reprodução* de um reator, representado por K , corresponde ao número médio de novas fissões que podem ser produzidas. No caso do urânio-235 o fator de reprodução máximo é $K = 2,4$, o que significa que são ejetados 2,4 nêutrons em média por fissão; contudo, vimos que na prática esse número é bem menor. Em um reator de fissão o fator de reprodução deve ser $K = 1$ para que a reação seja autossustentada; mas quando $K < 1$ a reação não prossegue e, no caso de $K > 1$, a reação é explosiva (TIPLER; LLEWELLYN, 2006).

Um reator em funcionamento pode ser desligado e, assim, interromper a sequência de fissões nucleares; entretanto, o decaimento radioativo dos núcleos resultantes das fissões continua, logo é um processo espontâneo e incontrolável pelo homem. Assim, o reator continua superaquecendo mesmo depois de interrompida a reação em cadeia, até que os fragmentos de fissão se transformem em isótopos estáveis de chumbo.

A.9.2. A bomba atômica: reação em cadeia explosiva

A bomba atômica é um artefato que produz uma reação em cadeia de forma incontrolável, cujo fator de reprodução é $K \gg 1$. Uma vez iniciado o processo de fissão, o sistema pode explodir em frações de segundo; mas para ocorrer a fissão é necessário que haja uma quantidade mínima de material físsil, chamada de *massa crítica*. No caso de uma bomba atômica, a massa físsil deve ser maior do que a massa crítica para sustentar a reação em cadeia explosiva. Um quilograma de urânio-235 ou de plutônio-239 já possui massa crítica suficiente para iniciar o processo de fissão explosivo.

O problema é de geometria, isto é, a reação em cadeia depende da razão entre a área superficial e a massa do material, para que não se extinga. Por exemplo, a reação em cadeia em um pequeno pedaço de urânio-235 não se sustenta porque os nêutrons escapam rapidamente pela superfície do material antes que ocorra a explosão, em razão de a amostra pequena ter uma área superficial grande em relação à sua massa; contudo, quando o pedaço de urânio-235 é maior, a razão entre a área superficial e a massa do material é menor, e, neste caso, a reação em cadeia libera enormes quantidades de energia antes que os nêutrons escapem pela superfície. (HEWITT, 2011).

Na bomba atômica o combustível nuclear é colocado em tantos compartimentos separados quantos forem necessários para que a massa se mantenha abaixo da massa crítica em quantidade insuficiente para provocar uma explosão inesperada (SAFFIOTI, 1982). Em um dos vários modelos, o urânio-235 é armazenado em duas semiesferas separadas por um espaço vazio (figura 16). Os nêutrons do material físsil em cada semiesfera escapam pela superfície antes que uma reação em cadeia seja iniciada. As semiesferas são revestidas com grafite ou berílio, que funcionam como moderador e refletor de nêutrons. O artefato é munido de um explosivo comum e de um detonador. O detonador, ao ser acionado, provoca a explosão da carga comum que desloca a semiesfera (projétil) próxima a ele. A primeira semiesfera se projeta sobre a outra semiesfera (alvo), e quando se juntam, forma-se um único pedaço com uma quantidade de massa crítica suficiente para iniciar a reação em cadeia e provocar a explosão da bomba em uma fração de segundo. Esse mecanismo foi usado na bomba atômica lançada na cidade japonesa de Hiroshima, em agosto de 1945.

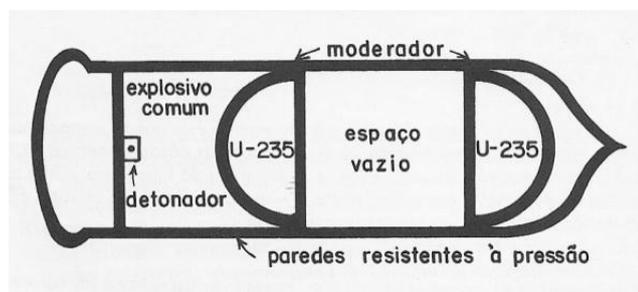


Figura 16: Esquema da bomba atômica de urânio.
Fonte: Saffioti (1982, p. 127).

Para a bomba atômica de plutônio, construída pelos norte-americanos na Segunda Guerra Mundial, foi desenvolvido um complexo projeto de implosão. O plutônio-239 é

produzido artificialmente nos reatores nucleares, onde núcleos férteis de urânio-238 se transformam em núcleos físséis de plutônio-239 pela ação de nêutrons. Contudo, o plutônio obtido nos reatores contém vários isótopos, ou seja, não é puro. Os projetistas constataram, então, que o mecanismo de explosão para a bomba de plutônio não funcionaria, uma vez que haveria produção de nêutrons adicionais que poderiam detonar a bomba precocemente e com baixa eficiência. Em virtude desse problema, foi desenvolvido o mecanismo de implosão. O modelo consiste de uma massa subcrítica de plutônio em torno da qual se distribui o explosivo, como se fosse um embrulho. Ao detonar, uma onda de choque é direcionada simetricamente para o centro, comprimindo o plutônio. Com o aumento de densidade, a distância entre os núcleos de plutônio encurta, favorecendo a reação em cadeia explosiva.

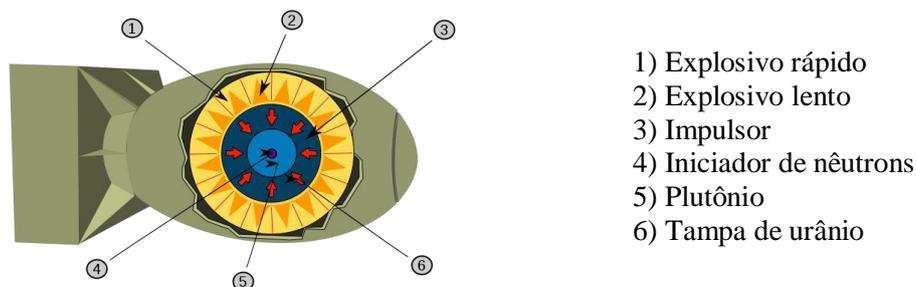


Figura 17: Esquema da bomba atômica de plutônio.

Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Implosion_Nuclear_weapon_tag.svg.

O complexo modelo teórico de implosão era um problema de engenharia muito difícil, mas foi executado e testado com sucesso.

Segundo Saffioti (1982), uma bomba atômica, ao ser lançada de um avião, explode com grande precisão no instante e na altura previamente calculados, como a bomba lançada pelos norte-americanos em Hiroshima. A que foi lançada em Nagasaki sofreu um desvio em virtude das condições climáticas no dia do ataque, caindo em um vale perto da cidade.

QUESTIONÁRIO PARA PROFESSORES DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

Caro Professor:

O presente questionário, direcionado a professores de Física do Ensino Médio dos Núcleos Regionais de Educação de Maringá, Paranavaí, Campo Mourão, Umuarama, Toledo e Goioerê, Estado do Paraná, tem a finalidade de verificar o que os docentes vivenciam e pensam a respeito do ensino do tema *radioatividade* no Nível Médio.

A sua opinião é de extrema importância para podermos elaborar uma proposta metodológica para o ensino deste tema no Nível Médio. Contamos com a sua participação.

1. A) Qual o curso de sua formação acadêmica? Cite se o curso é de licenciatura e/ou de bacharelado.

RESPOSTA:

- B) Qual a habilitação?

RESPOSTA:

- C) Que cursos de pós-graduação você possui? Cite o(s) nome(s) do(s) curso(s).

RESPOSTA:

Especialização:

.....

.....

Outro(s):

2. Qual é a modalidade em que você atua no Ensino Médio (EM)?

- () Ensino regular
() Ensino regular por blocos
() Ensino profissionalizante
() Educação de Jovens e Adultos – EJA

3. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) para o Ensino Médio, de 1998, recomendam uma ênfase à Física Moderna e Contemporânea (FMC) ao longo de todo o curso. Sabe-se também que é consenso entre os pesquisadores da área de Ensino de Física que conteúdos de FMC devem ser abordados no Ensino Médio. Você concorda que é importante introduzir conteúdos de FMC no Ensino Médio?
- Sim, é muito importante.
 - Sim, é importante, mas não é essencial
 - Sim, é importante, desde que sejam cobrados nos exames de vestibular
 - Não é importante
 - Não sei
4. Você já participou de algum curso presencial de formação continuada que abordasse tópicos de Física Moderna e Contemporânea?
- Sim
 - Não
5. Em sua opinião, há alguma dificuldade para o ensino de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea no Nível Médio? Caso a resposta seja sim, enumere apenas as alternativas que você considera pertinentes, em ordem da maior para a menor dificuldade:
- Adequar os conteúdos para o EM.
 - Carga horária semanal insuficiente para a introdução dos conteúdos.
 - Pouca disponibilidade de recursos didático-pedagógicos.
 - Resistência do professor em reorientar sua prática pedagógica.
 - Conteúdos de FMC não foram abordados durante a graduação.
 - Conteúdos de FMC foram abordados superficialmente durante a graduação.
 - Formação inicial pautada no formalismo matemático com relação à FMC.
 - Carência de cursos de formação continuada na área de FMC.
 - O professor tem pouco tempo disponível para pesquisa e preparação de aulas de FMC.
 - A FMC é incompreensível, difícil e abstrata para os estudantes do EM.
 - Alunos do EM apresentam defasagem de conteúdos de Matemática básica para compreenderem o formalismo matemático de FMC.

- Falta de entusiasmo do professor.
- Outras (citar):

6. A radioatividade está entre os temas de FMC mais indicados que devem ser ensinados no Nível Médio. Você já abordou este tema em sala de aula durante o ano letivo (neste ano e/ou em anos anteriores)?

- Sim, já abordei ocasionalmente alguns conceitos e aplicações.
- Sim, sempre abordo alguns conceitos e aplicações.
- Sim, eu ensino o tema.
- Não, porque há obstáculos para a abordagem do tema.
- Não, porque o tema não consta no livro didático adotado.
- Não, porque não considero o tema importante.
- Nunca pensei a respeito.
- Outra (justificar):

7. Entre os recursos listados abaixo, assinale aqueles que você julga fundamentais para o professor utilizar para pesquisa, estudo e preparação de aulas de temas de Física Moderna e Contemporânea, em particular a *radioatividade*:

- Livros de Física do Ensino Superior
- Livros paradidáticos de Física
- Livro didático de Física para o Ensino Médio
- Revistas científicas
- Periódicos na área de ensino de Física
- Jornais
- Laboratório de informática e internet
- Filmes de ficção científica que apresentem corretamente aplicações de FMC
- Vídeos e imagens
- Documentários
- Laboratório de Física
- Outros (citar):

8. Considere a possibilidade de abordar o tópico *radioatividade* em sala de aula. Em sua opinião, que forma de abordagem deve prevalecer?

- Abordagem pautada no formalismo matemático
- Abordagem qualitativa, explorando os conceitos físicos
- Abordagem qualitativa, acrescida de breve formalismo matemático
- Abordagem equilibrada entre a qualitativa e o formalismo matemático
- Não tenho ideia
- Outra (especificar):

9. Com relação à pergunta anterior:

A) Qual o número de aulas você julga adequado para abordar o tema e avaliar os alunos, levando-se em consideração a carga horária semanal de Física?

- 2 aulas
- 4 aulas
- 6 aulas
- 8 aulas
- Não tenho ideia
- Outra (especificar):

B) Em sua opinião, em que série(s) o tema deve ser abordado?

- 1ª série
- 2ª série
- 3ª série

10. Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) apontam para uma orientação do ensino de Física com enfoque na História e Filosofia da Ciência (HFC) e nas relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). Em sua opinião, você considera que o ensino, segundo essas perspectivas, pode motivar o aluno a estudar Física? Escreva sobre isso:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

11. Se você tivesse disponível uma proposta para o ensino da radioatividade no Nível Médio, com possibilidade de inserção em sala de aula, você gostaria de pôr em prática? Escreva sobre isso:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Professor(a), agradecemos a sua valiosa contribuição.

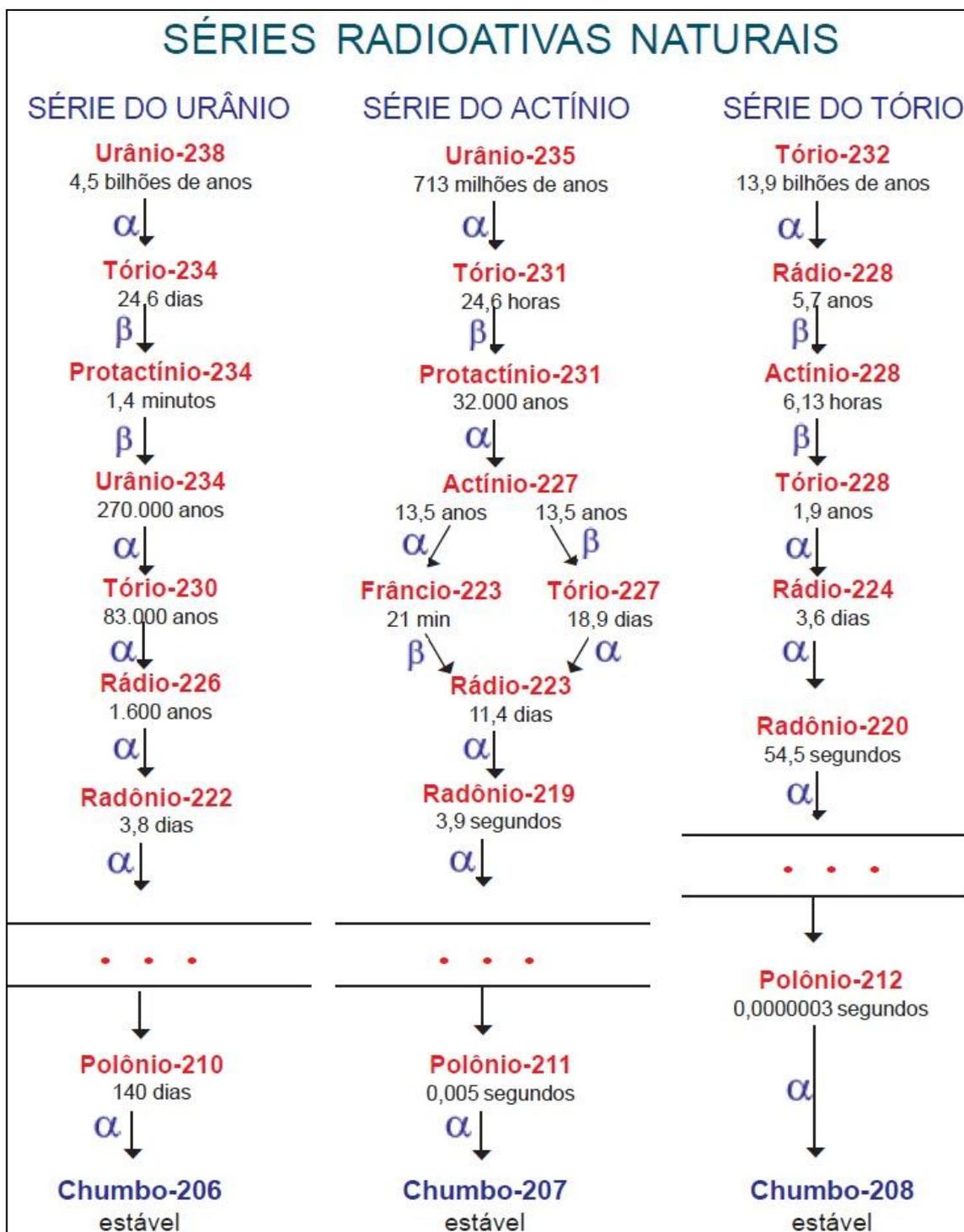
Maringá, de de 2012.

Silvia Oliveira Resquetti
(Pós-Graduanda)

Polonia Altoé Fusinato
(Orientadora)

ANEXOS

SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS



Fonte: Cardoso [200-b, p. 13].

TIPOS DE REATORES NUCLEARES DE POTÊNCIA

Combustível	Enriquecimento	Moderador	Refrigerante	Tipo de reator	País de origem
UO ₂	2% a 4%	H ₂ O	H ₂ O	PWR	EUA
UO ₂	2% a 4%	H ₂ O	H ₂ O (fervente)	BWR	EUA
U metálico	-	Grafite	CO ₂	GCR	Reino Unido
UO ₂	2% a 4%	Grafite	CO ₂	AGR	Reino Unido
ThC ₂ + UC ₂	93%	Grafite	He	HTGR	EUA, Reino Unido, Alemanha.
UO ₂	-	DO ₂	DO ₂	PHWR	Canadá
UO ₂	2% a 4%	DO ₂	H ₂ O (fervente)	SGHWR	Reino Unido
UO ₂	2% a 4%	Grafite	H ₂ O (fervente)	RBWR	URSS
UO ₂ + PU ₂	-	-	Na líquido	FBR	Vários

PWR: reator refrigerado a água Pressurizada; **BWR:** reator refrigerado a água fervente; **GCR:** reator refrigerado a Gás; **AGR:** reator avançado refrigerado a gás; **HTGR:** reator refrigerado a gás com temperatura elevada; **PHWR:** reator refrigerado a água pesada pressurizada; **SGHWR:** reator gerador de vapor moderado a água pesada; **RBWR:** reator refrigerado a água fervente e moderado a grafite; **FBR:** reator rápido.

Fonte: Terremoto (2004, p. 104).

TABELA: EFEITOS DA RADIO-EXPOSIÇÃO AGUDA EM UM INDIVÍDUO ADULTO.

FORMA	DOSE ABSORVIDA	SINTOMATOLOGIA
Infraclínica	Inferior a 1 Gy	Ausência de sintomatologia na maioria dos indivíduos.
Reações gerais leves	1 – 2 Gy	Astenia, náuseas, vômitos (3 a 6 h após a exposição; sedação em 24 h).
Hematopoiética leve	2 – 4 Gy	Função medular atingida: linfopenia, leucopenia trombopenia, anemia; recuperação em 6 meses.
Hematopoiética grave	4 – 6 Gy	Função medular gravemente atingida.
DL ₅₀	4 – 4,5 Gy	Morte de 50% dos indivíduos irradiados
Gastrointestinal	6 - 7 Gy	Diarreia, vômitos, hemorragias, morte em 5 ou 6 dias.
Pulmonar	8 – 9 Gy	Insuficiência respiratória aguda, coma e morte entre 14 e 36 h.
Cerebral	Superior a 10 Gy	Morte em poucas horas por colapso.

Fonte: Nouailhetas [200-, p. 32].

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

R434u Resquetti, Silvia Oliveira
Uma sequência didática para o ensino da radioatividade no Nível Médio, com enfoque na História e Filosofia da Ciência e do movimento CTS / Silvia Oliveira Resquetti. -- Maringá, 2013. 280 f. : il. color., figs., tabs., quadros

Orientadora: Prof. Dr.a Polônia Altoé Fusinato. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, 2013

1. Física - Ensino médio - Ensino. 2. Física moderna e contemporânea - Ensino médio. 3. Radioatividade. 4. Professores de física. 5. Física - Livros didáticos. I. Fusinato, Polônia Altoé, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática. III. Título.

CDD 21.ed. 539.7