

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Universidade  
Estadual de  
Feira de Santana



# BOMBA ATÔMICA: ENSINANDO FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR NUM CONTEXTO HISTÓRICO E SOCIOCULTURAL

MARCOS VINICIUS LIMA SOUZA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora: Profa. Dra. Indianara Lima Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Elder Sales Teixeira

FEIRA DE SANTANA – BAHIA

MAIO DE 2016

Souza, Marcos Vinicius Lima

S716 Bomba atômica: ensinando Física e energia nuclear num contexto histórico e sociocultural/Marcos Vinicius Lima Souza.–Feira de Santana, 2016.

191f.: il.

Orientadora: Indianara Lima Silva.

Coorientador: Elder Sales Teixeira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Mestrado Profissional de Ensino de Física, 2016.

1. Física – Ensino. 2. Física nuclear. 3. Energia nuclear. I. Silva, Indianara Lima, orient. II. Teixeira, Elder Sales, coorient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU:53(07)

# BOMBA ATÔMICA: ENSINANDO FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR NUM CONTEXTO HISTÓRICO E SOCIOCULTURAL

Marcos Vinicius Lima Souza

Orientadora: Profa. Dra. Indianara Lima Silva

Coorientador: Prof. Dr. Elder Sales Teixeira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por

---

Profa. Dra. Indianara Lima Silva

---

Prof. Dr. Olival Freire Junior

---

Prof. Dr. Álvaro Santos Alves

---

Prof. Dr. Franz Peter Alves Farias

FEIRA DE SANTANA – BAHIA

MAIO DE 2016

## **DEDICO A...**

Meu pai, Vital dos Santos Souza (*in memoriam*), minha referência de integridade e companheirismo.

À minha mãe, Maria Edilma Lima Souza, mulher trabalhadora e nobre, que sempre acreditou em mim e me apoiou em meus sonhos, dando-me força para seguir em frente.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e sabedoria para seguir meus sonhos.

Agradeço aos meus orientadores pelos conselhos e apoio que me ajudaram a concluir este trabalho.

Agradeço aos professores do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, Pólo 6 – pela garra em trilhar este caminho junto a nós e por todo conhecimento que pudemos compartilhar em nossos encontros.

Agradeço aos colegas deste mestrado que encararam este desafio junto comigo e que me apoiaram e me deram força em muitos momentos que parecia que estava mais difícil do que poderíamos suportar durante os anos em que estudamos e trabalhamos, reduzindo nossas horas de lazer em busca de conhecimento.

Agradeço à minha noiva pela compreensão e apoio, pois sei que em muitos momentos tive que ficar em casa me dedicando aos estudos.

Agradeço aos meus familiares e amigos que me viram diminuir as reuniões sociais devido à falta de tempo, mas que acredito que foram compreensíveis e sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro por meio da bolsa concedida.

## RESUMO

### BOMBA ATÔMICA: ENSINANDO FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR NUM CONTEXTO HISTÓRICO E SOCIOCULTURAL

Marcos Vinicius Lima Souza

Orientadora: Profa. Dra. Indianara Lima Silva

Coorientador: Prof. Dr. Elder Sales Teixeira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

A Física Moderna e Contemporânea (FMC) está presente em nossas vidas, permeando a tecnologia que utilizamos e ajustando hábitos sociais e culturais, mas ainda é deixada de lado na maioria das escolas de Ensino Médio (EM). Visando trabalhar alguns conceitos de Física e Energia Nuclear, elaboramos e aplicamos uma Sequência Didática (SD) que traz como tema gerador a Bomba Atômica segundo a pedagogia freireana e os Três Momentos Pedagógicos (TMP) propostos por Deilizocov e Angotti. Ao longo dos encontros, usamos a História e Filosofia da Ciência (HFC) e a abordagem Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) para ensinar conceitos físicos, bem como para discutir aspectos militares e éticos sobre a produção deste tipo de armamento e o uso de sua tecnologia para a energia nuclear. Foram abordadas as questões políticas, sociais e éticas subjacentes à construção de tal arma nuclear, objetivando a formação cidadã e um aprendizado mais efetivo para o aluno e benéfico para a sociedade. A participação dos alunos durante as aulas foi maior, quando comparada às aulas antes da aplicação da SD, e demonstraram uma boa compreensão dos conteúdos trabalhados nesta proposta.

**Palavras chave:** Ensino de Física; Física e Energia Nuclear; Sequência Didática; Pedagogia Freireana; História e Filosofia da Ciência (HFC); Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA).

FEIRA DE SANTANA – BAHIA

MAIO DE 2016

## ABSTRACT

### ATOMIC BOMB: TEACHING NUCLEAR PHYSICS AND NUCLEAR ENERGY IN A HISTORICAL CONTEXT AND SOCIOCULTURAL

Marcos Vinicius Lima Souza

Supervisor(s):

Profa. Dra. Indianara Lima Silva

Prof. Dr. Elder Sales Teixeira

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação de Ensino de Física in the Course of Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), as part of the requirements for obtaining the Master's degree in Physics Teaching.

The Modern and Contemporary Physics is present in our lives, permeating the technology we use and adjusting social and cultural habits, but it is still sidelined most of the high schools. Aiming to work some concepts of Physics and Nuclear Power, elaborated and applied a Didactic Sequence that brings the theme generator the Atomic Bomb according to Freire's pedagogy and the Three Pedagogical Moments proposed by Deilizocov and Angotti. Throughout the meetings, use the History and Philosophy of Science and science approach, Technology, Society and Environment to teach physical concepts as well as to discuss military and ethical aspects of the production of such weapons and use of its technology for nuclear energy. Political, social and ethical issues underlying the construction of such a nuclear weapon were discussed, aimed at civic education and a more effective learning for students and beneficial to society. The participation of students during class was higher compared to classes before the implementation of didactic sequence, and demonstrated a good understanding of the contents worked on this proposal.

**Key words:** Teaching of Physics; Nuclear Physics and Nuclear Energy; Teaching Sequence; Paulo Freire Pedagogy; History and Philosophy of Science; Science, Technology, Society and Environment.

FEIRA DE SANTANA – BAHIA

MAY, 2016

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	8
CAPÍTULO 1: REVISÃO DA LITERATURA .....	16
<b>1.1. História e Filosofia da Ciência (HFC)</b> .....	24
<b>1.2. Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA)</b> .....	27
CAPÍTULO 2: REFERENCIAL TEÓRICO.....	35
<b>2.1. Pedagogia de Paulo Freire</b> .....	35
<b>2.2. Os Três Momentos Pedagógicos (TMP)</b> .....	42
CAPÍTULO 3: METODOLOGIA DA PROPOSTA .....	46
CAPÍTULO 4: SEQUÊNCIA DIDÁTICA .....	49
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	58
REFERÊNCIAS .....	74
PRODUTO EDUCACIONAL .....	80

## INTRODUÇÃO

A Física Moderna surge no início do século XX ao tentar resolver problemas não explicados pela Física Clássica. Entretanto, apesar de já ter passado mais de um século desde suas primeiras pesquisas e explicações, no cenário do ensino de Física em escolas do Ensino Médio (EM), o que se percebe é a utilização de um currículo engessado e fechado que trata apenas da Física até o século XIX. Tal ação impossibilita que alguns alunos tenham acesso a explicações sobre diversos fenômenos e diversas aplicações tecnológicas que permeiam nossas vidas cotidianamente, ou até mesmo, acesso a temas controversos que os preparem para a tomada de decisões na sociedade.

A proposta aqui apresentada trata da elaboração e aplicação de uma Sequência Didática (SD) sobre o episódio da bomba atômica, baseada na pedagogia freireana. Foram discutidos os conceitos de Fissão Nuclear e Energia Nuclear com base na História e Filosofia da Ciência (HFC) e na abordagem da Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA). Também abordamos as questões políticas, sociais e éticas subjacentes à construção de tal arma nuclear. Tal reflexão torna-se necessária visto que, apesar de ter sido um marco histórico sua construção e utilização durante a 2ª Guerra Mundial, ainda hoje há conflitos militares e éticos sobre a produção deste tipo de armamento. O ensino do conteúdo científico, bem como as reflexões que trazemos sobre usos e abusos da bomba atômica podem contribuir para a formação para a cidadania. Segundo Martins e Mogarro (2010, p. 192), estudos apontaram “que os conhecimentos dos adolescentes sobre as instituições democráticas e as competências de cidadania, em particular a participação na vida política, estão aquém do que seria desejável numa sociedade democrática”. Levar para sala de aula discussões que possibilitem a interlocução entre conteúdo científico e questões político-sociais pode contribuir para um aprendizado mais efetivo para o aluno e benéfico para a sociedade.

Em 2015 uma proposta de reestruturação dos currículos começou a ser discutida em diversas instituições de ensino e foi chamada de Base Nacional Comum Curricular (BNCC), a qual demonstra o interesse em uma formação mais homogênea desde a Creche até o Ensino Médio para todo o país. Na BNCC aparecem ideias aqui propostas demonstrando uma sintonia entre este trabalho e a visão de diversos profissionais para o ensino de Física:

A Física é uma construção humana e como tal deve ser apresentada. Isso implica considerar a história passada e presente, em suas diversas interpretações possíveis, como caminho para a compreensão da ciência como

instituição social. Trabalhar na interlocução ciência, tecnologia e sociedade proporciona uma ampliação da percepção do papel da Física como saber social. O conhecimento proporcionado pela Física é social, o que traz implicações de natureza política, econômica e, também, ética. Saber Física e sobre a Física contribui para entender e posicionar-se criticamente frente a questões tecnocientíficas da atualidade que envolvem diversos interesses e grupos sociais. Se queremos ou não investir em mais usinas ou submarinos nucleares, é apenas um exemplo. O conhecimento físico na forma de leis, conceitos, grandezas e relações matemáticas só ganha significado se utilizado em problemas reais, tornando-se, assim, um instrumento de participação mais consciente e consistente na sociedade, propiciando, por exemplo, avaliar os efeitos biológicos da radiação em um exame de radiografia ou tomografia, o uso de diferentes formas de energia elétrica e seus efeitos ambiental e socioeconômico ou mesmo compreender o funcionamento de eletrodomésticos e os cuidados que devem ser tomados em sua instalação e utilização. O conhecimento científico dialoga com outros elementos da cultura representados, por exemplo, em produções da literatura, das artes plásticas, do teatro e da música. Assim, os contextos histórico e social, e também o contexto cultural, se constituem como cenários para a produção de sentidos e significados para o conhecimento da Física e das outras ciências. (BNCC, 2015, p. 205)

Temos, portanto, a visão de que saber Física e sobre a Física passa por uma abordagem contextual através da HFC e da abordagem CTSA, trazendo para o conteúdo discussões que visem à formação cidadã de nossos alunos.

Tratando da relevância dada ao estudo de temas científicos, Díaz (2004) traça um panorama que, dentre outras razões, apresenta a ciência como sendo útil para as pessoas que, ao praticarem sua cidadania, podem ajudar na tomada de decisão sobre temas científicos e tecnológicos:

Presta especial atención al ejercicio de la ciudadanía en una sociedad democrática. Prepara para enfrentarse en la vida real a muchas cuestiones de interés social relacionadas con la ciencia y la tecnología y tomar decisiones razonadas sobre ellas. Es sostenida por quienes defienden una educación científica para la acción social. (DÍAZ, 2004, p. 6)

Esta perspectiva de formação cidadã a partir do ensino da ciência também é apontada por Azevedo e Pietrocola (2008, p. 2):

A necessidade de atualização curricular nos conteúdos de física vem sendo debatida e proposta pelo menos há vinte anos. Muitos pesquisadores têm se dedicado a buscar formas de fazer essa introdução e produzir o material necessário para isso. Esta atualização, por meio da inserção de tópicos de física moderna e contemporânea (FMC) no currículo do ensino médio, se justifica de várias formas. Entre outras, podem-se citar a necessidade de formação de um cidadão que possa compreender a realidade em que vive, e

cuja formação geral propicie sua intervenção nessa realidade, e a apresentação da Física como fundamento da tecnologia presente no cotidiano do aluno.

A sociedade está imersa em um mundo científico cuja formalização é desconhecida pela maioria das pessoas. Os avanços tecnológicos das últimas décadas criaram barreiras e isolaram algumas pessoas que estão à margem do conhecimento que permite a sua utilização e grande parte dos cidadãos não sabe lidar com a imensa quantidade de informações geradas pela tecnologia. Mesmo que não haja um aprofundamento no conhecimento científico, como é visto em universidades e centros de ensino, a divulgação científica é importante para que tomadas de decisões com base em seus princípios sejam feitas com maior esclarecimento e responsabilidade social. É direito de todo sujeito exercer sua cidadania e como cidadão é necessário conhecer problemas políticos e éticos de seu grupo social. A conscientização global deste direito é enfatizada pela Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) desde a Conferência Mundial sobre Ciência para o Século XXI: um Novo Compromisso, que ocorreu em Budapeste, Hungria, de 26 de junho a 1º de julho de 1999, sob a égide da UNESCO e do Conselho Internacional para a Ciência (ICSU):

A ética e a responsabilidade da ciência deve ser parte integrante da educação e da formação de todos os cientistas. É importante inculcar nos alunos uma atitude positiva em relação à reflexão, à atenção e à consciência dos dilemas éticos que podem vir a encontrar na sua vida profissional. Os jovens cientistas devem ser encorajados, de maneira adequada, a respeitar e a aderir aos princípios básicos e às responsabilidades éticas da ciência. (UNESCO, 2003, p. 64)

Acreditamos que a análise contextual proposta aqui, juntamente com a pedagogia freireana, possibilita uma abordagem dessa perspectiva para a ciência, em particular para a temática sobre a bomba atômica.

Com essa intenção, a pretensão foi de responder ao questionamento: Como uma sequência didática pode ser elaborada para ensinar Física e Energia Nuclear utilizando o episódio da bomba atômica, como tema gerador, através de uma abordagem histórica e sociocultural?

Para termos uma abordagem contextualizada sobre a Física Nuclear, a partir da bomba atômica, e os benefícios e malefícios científicos, sociais, tecnológicos e ambientais do uso da Energia Nuclear, bem como de alguns conceitos de radioatividade, utilizamos a abordagem

CTSA e a HFC durante a construção da Sequência Didática que foi implementada para ensinar aqueles conceitos físicos.

A escolha do uso da bomba nuclear como tema gerador para as aulas se deve ao fato de ser uma temática moderna, que possibilita a discussão de vários conhecimentos, contextualizando o conteúdo e trabalhando a formação cidadã. Angotti (1993) já propunha a utilização deste tema visto como importante, mas ignorado devido à existência de um currículo fechado e engessado na física existente até o século XIX.

Temas que encerram grandes contradições nacionais, não vinculados a épocas ou locais muito precisos merecem destaque na educação escolar; as especificidades de cada região estarão inseridas e contempladas, mantidas suas relações com os Temas de amplas dimensões. Temas emergentes como os recentes acidentes nucleares no exterior e no país, continuam solenemente ignorados pelo sistema escolar, dada sua exclusão das ementas e programas. Se alguma elasticidade houvesse nos cursos, certamente tais assuntos teriam sido analisados na ocasião, com suporte bibliográfico construído pelos professores uma vez que não há informação disponível nos livros didáticos e os artigos especializados não são produzidos imediatamente. Do noticiário e do conhecimento advindo de sua formação crítica, os professores são desafiados a contribuir, individualmente ou em equipe. Programas mais abertos e elásticos precisam de algum compromisso com essas possibilidades e também com o conhecimento recentemente conquistado; do contrário continuaremos a privilegiar a ciência e tecnologia disponíveis até o século passado, obstruindo justamente o conhecimento atual que atinge os alunos pelas vias da educação informal, que de alguma forma os sensibiliza enquanto atores e sujeitos de um mundo mergulhado em rápidas mudanças. (ANGOTTI, 1993, p. 194)

Apesar de passados 23 anos desde a publicação deste texto, ele ainda é recente, visto que notícias de acidentes nucleares ainda ocorrem - como nas usinas nucleares de Fukushima em 2011 - e dos atritos político-militares entre países que podem possuir, ou já possuem, armas nucleares são mostradas nos noticiários e outros veículos de informação.

A BNCC também sugere que uma das seis *unidades de conhecimento (UCF)* para a organização dos currículos de Física trate deste tema, com o título “UC5F \_ Matéria e radiação em sistemas e processos naturais e tecnológicos” e traz a seguinte descrição:

Nesta unidade são apresentados conhecimentos da Física que auxiliam a compreensão do uso das radiações em variadas atividade na atualidade, como em diagnósticos médicos, como radiografia e tomografia, na produção de energia com base em processos nucleares, ou nas guerras com as bombas de fissão e fusão nuclear. Isso depende de responder diferentes questões: no que diferem essas radiações? Como elas são produzidas? Como as diferentes radiações interagem com a matéria? Do que a matéria é constituída? Quais são os efeitos biológicos e ambientais das diferentes radiações? Esta unidade

estuda as propriedades das radiações e da matéria, bem como suas interações. (BNCC, 2015, p. 208)

A busca pela inserção de temas da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio não é atual, mas infelizmente ainda predomina a falta de informações nos livros didáticos sobre a FMC, o que torna a Sequência Didática proposta aqui uma forma de trazer estes conhecimentos para a sala de aula. Segundo Araújo (2013, p. 323), uma SD “*é um modo de o professor organizar as atividades de ensino em função de núcleos temáticos e procedimentais*”, procurando favorecer, desta forma, o aprendizado dos alunos. Contudo, o professor deve estar ciente que não é uma tarefa simples e exige que este se empenhe em sua execução, pois:

A construção de sequências didáticas sobre o conteúdo de FMC é um problema que se situa na interface entre o conhecimento científico e o conhecimento escolar. Esta interface não é apenas conceitual, mas envolve o professor, as necessidades da sala de aula e os relacionamentos que se estabelecem neste ambiente, todos determinantes para o sucesso da sequência didática. Esta construção é, assim, uma tarefa complexa. Vale acrescentar que as exigências de sala de aula impõem que se tenham as aplicações de atividades em condições reais como uma obrigação inevitável. (AZEVEDO e PIETROCOLA, 2008, p. 2)

Este pensamento é reforçado por Giordan *et. al.*:

[...] podemos concluir que ao se tratar de processos de construção de SD e práticas de ensino é preciso que se considere as teorias que envolvem tais metodologias, o contexto escolar e ainda as questões culturais que permeiam o conhecimento científico em questão. Nesse sentido, o desenvolvimento, aplicação e avaliação de Sequências Didáticas pode adquirir um caráter mais amplo no processo de ensino do que por vezes encontramos discutido na literatura. (GIORDAN *et. al.*, 2012, p. 11)

No capítulo 1 trazemos uma lista de artigos encontrados em revistas, os quais tratam de alguma das propostas que utilizamos, mas na literatura pesquisada não há nenhuma abordagem semelhante para o tema aqui proposto.

As publicações foram analisadas no período de 2000 a 2014, e conforme podemos ver no Gráfico 1, houve um aumento significativo no número de publicações sobre HFC nesse período. Contudo, como destaca Teixeira *et.al.* (2012, p. 16), “*apesar do aumento significativo do número de artigos que tratam do uso de HFC no Ensino das Ciências, o*

*número de pesquisas empíricas que investigam intervenção didática com HFC nas salas de aula de Física é ainda pequeno”.*

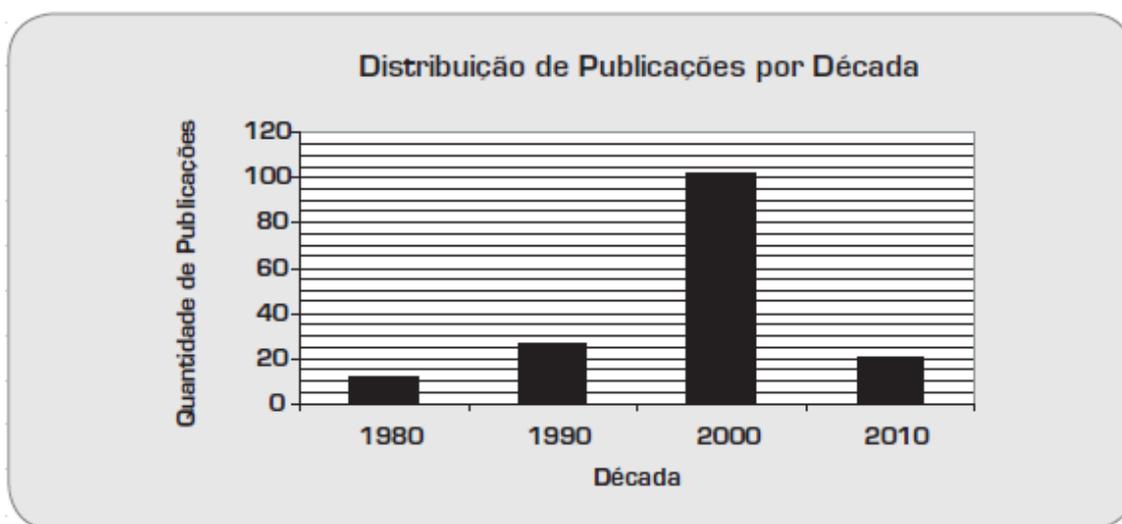


Gráfico 1: Distribuição, por década, do número de publicações que foram selecionadas (total = 160 artigos). (TEIXEIRA *et.al.*, 2012, p.15)

Muitas das propostas apresentadas em eventos, encontros ou publicadas em revistas não investigam, de fato, as intervenções didáticas propostas ou sequer sugerem alguma intervenção. Tal aplicação da HFC não é uma prática simplista e requer um maior trabalho por parte do professor, como trata Martins:

As principais dificuldades surgem quando pensamos na utilização da HFC para fins didáticos, ou seja, quando passamos dos cursos de formação inicial para o contexto aplicado do ensino e aprendizagem das ciências. (MARTINS, 2006, p. 115)

Apesar de incomum, o uso da HFC na construção de uma intervenção didática é uma estratégia possível de ser usada e será encarada como uma forma de facilitar a compreensão de teorias e conceitos e, assim, tornar o ensino de ciências, e mais especificamente o de Física, mais humano e próximo da realidade dos estudantes. Nesta visão, destaca-se o pensamento de Matthews:

A história e a filosofia podem dar às idealizações em ciência uma dimensão mais humana e compreensível e podem explicá-las como artefatos dignos de serem apreciados por si mesmos. (MATTHEWS, 1995, p. 184)

Desta maneira, a HFC conduz os alunos a uma visão mais social da ciência. O processo de construção da ciência está atrelado ao contexto político, social e econômico no qual os cientistas estão inseridos. Há também o interesse em desmistificar a visão de que a ciência é resultado do trabalho de alguns cientistas geniais.

Buscando uma contextualização histórico-cultural, o uso do enfoque Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) aliada à pedagogia freireana traz um complemento à HFC na criação de uma intervenção didática em sala de aula de Física. Essa foi a nossa proposta.

Segundo os autores Fernandes e Marques (2009), que fizeram um levantamento bibliográfico sobre o uso do enfoque CTS vinculado à perspectiva freireana de ensino:

A abordagem de temas contemporâneos relacionados à ciência e tecnologia que tenham implicações sociais pode ser favorecida em associação à perspectiva educacional de Paulo Freire, que defende uma educação que “problematize” as situações vivenciadas pelos educandos e que efetivamente dê significado a estas pela voz dos sujeitos e pelos conhecimentos historicamente produzidos pela humanidade, entre os quais os conhecimentos científicos. (FERNANDES E MARQUES, 2009, p. 3)

A ideia da “problematização” que Freire propõe será tratada aqui no sentido ontológico, quando se faz necessária a comunicação como caminho para o surgimento de uma prática social e política. Ainda através dela, o conhecimento se torna, além de social, histórico com possibilidade de intervenção sobre a realidade. Nesta perspectiva que se comunica com a HFC e com o enfoque CTSA.

Outro verbete presente no ideário freireano que está presente nas relações almejadas por este trabalho é a “criticidade”. Buscar o conhecimento para uma melhor compreensão da realidade e nela poder intervir só é possível se o ser humano puder fazer uma leitura crítica dos acontecimentos da sociedade em que vive e do mundo em que vivemos. Segundo Auler et. al. (2009, p. 68):

Nesse sentido, entende-se que, para uma leitura crítica do mundo contemporâneo, para o engajamento em sua transformação, torna-se, cada vez mais, fundamental uma compreensão crítica sobre as interações entre Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS), considerando que a dinâmica social contemporânea está progressivamente condicionada pelos avanços no campo científico-tecnológico.

Através da abordagem contextual, utilizando a abordagem CTSA e a HFC, apoiadas na pedagogia Freireana, acreditamos que é possível trabalhar temas da Física Moderna e

Contemporânea (FMC) no Ensino Médio. Aplicamos uma Sequência Didática com este objetivo, e deixamos aqui algumas sugestões para outros professores que tenham a intenção de fazer o mesmo.

## CAPÍTULO 1

### REVISÃO DA LITERATURA

Realizamos pesquisas nas bases de dados da CAPES, do REDALYC, da RBEF e da UFSC, com palavras-chave que tratassem do tema proposto ou que se assemelhasse a ele. Foram pesquisadas as palavras “bomba atômica”, “bomba nuclear”, “arma nuclear”, “fissão nuclear”, “energia nuclear”, “nuclear”, “radiação nuclear”, “radioatividade”, “ressonância magnética” e “história da ciência”, buscando uma análise para a HFC e as palavras “CTSA”, “CTS”, “Ciência, Tecnologia e Sociedade”, “ciência e tecnologia”, “ciência e sociedade”, “tecnologia e sociedade”, “ciência e ambiente”, “tecnologia e ambiente”, “ciência”, “tecnologia”, “sociedade” e “ambiente”, procurando tratar do enfoque CTSA. Apresentamos a seguir o resultado da busca para os conteúdos aqui encontrados nas revistas: *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* (CBEF); *Ciência e Educação* (C&E); *Educar*; *Journal of Technology Management & Innovation*; *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences, Maringá*; *Revista Brasileira de Ensino de Física* (RBEF); *Redes*; *Revista Iberoamericana de Ciência, Tecnologia e Sociedade* (RICTS) e *Sociologias*, no período de 2000 a 2014, o qual foi escolhido devido ao aumento do número de publicações nas últimas décadas (TEIXEIRA et.al., 2012, p.15).

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA (CBEF)	
Uma Breve História da Política Nuclear Brasileira	Renato Yoichi Ribeiro Kuramoto Carlos Roberto Appoloni
Radioatividade Natural em Amostras Alimentares	Fábio Luiz Melquiades Carlos Roberto Appoloni
Aspectos do imaginário de licenciandos em física numa situação envolvendo a resolução de problemas e a questão nuclear	Thirza Pavan Sorpreso Maria José P. M. de Almeida
Uma discussão sobre a natureza da ciência no Ensino Médio: um exemplo com a Teoria da Relatividade Restrita	Janete F. Klein Köhnlein Luiz O. Q. Peduzzi
Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio	M. A. M. Souza J. D. Dantas
Entre os transurânicos e a fissão nuclear: um	Marinês D. Cordeiro

exemplo do papel da interdisciplinaridade em uma descoberta científica	Luiz O. Q. Peduzzi
<b>CIÊNCIA E EDUCAÇÃO (C&amp;E)</b>	
Ciência e tecnologia: implicações sociais e o papel da educação	José André Peres Angotti Milton Antonio Auth
Uma visão comparada do ensino em ciência, tecnologia e sociedade na escola e em um Museu de Ciência	Guaracira Gouvêa Maria Cristina Leal
Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro	Décio Auler Walter Antonio Bazzo
Tomada de decisão para ação social responsável no ensino de ciências	Wildson Luiz Pereira dos Santos Eduardo Fleury Mortimer
Uma experiência com o projeto Manhattan no ensino fundamental	Rafaela Samagaia Luiz O. Q. Peduzzi
Construção de práticas didático-pedagógicas com orientação CTS: impacto de um programa de formação continuada de professores de ciências do ensino básico	Celina Tenreiro-Vieira Rui Marques Vieira
Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque CTS para o contexto do ensino médio	Nilcéia Aparecida Maciel Pinheiro Rosemari Monteiro Castilho Foggiatto Silveira Walter Antonio Bazzo
O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania	João Praia Daniel Gil-Pérez Amparo Vilches
Configurações curriculares mediante o enfoque CTS: desafios a serem enfrentados na educação de jovens e adultos	Cristiane Muenchen Décio Auler
Ciência, tecnologia e suas relações sociais: a percepção de geradores de tecnologia e suas implicações na educação tecnológica	Rosemari Monteiro Castilho Foggiatto Silveira Walter Bazzo
Concepções de professores de química sobre	Ruth do Nascimento Firme

ciência, tecnologia, sociedade e suas inter-relações: um estudo preliminar para o desenvolvimento de abordagens CTS em sala de aula	Edenia Maria Ribeiro do Amaral
Discursos de licenciandos em física sobre a questão nuclear no ensino médio: foco na abordagem histórica	Thirza Pavan Sorpreso Maria José Pereira Monteiro de Almeida
Nanociência e nanotecnologia como temáticas para discussão de ciência, tecnologia, sociedade e ambiente	Rodrigo Siqueira-Batista Luciana Maria-Da-Silva Roberto Rômulo de Medeiros Souza Henrique Jannuzzelli Pires-Do-Prado Cláudio Aprígio da Silva Giselle Rôças Alexandre Lopes de Oliveira José Abdalla Helayël-Neto
Analisando a implementação de uma abordagem CTS na sala de aula de química	Ruth do Nascimento Firme Edenia Maria Ribeiro do Amaral
A temática ambiental e as diferentes compreensões dos professores de física em formação inicial	Luciano Fernandes Silva Luiz Marcelo de Carvalho
Ensino de ciências no ensino fundamental por meio de temas sociocientíficos: análise de uma prática pedagógica com vista à superação do ensino disciplinar	Juliana Viégas Mundim Wildson Luiz Pereira dos Santos
A área CTS no Brasil vista como rede social: onde aprendemos?	Alvaro Chrispino Leonardo Silva de Lima Márcia Bengio de Albuquerque Ana Claudia Carvalho de Freitas Marco Aurélio Ferreira Brasil da Silva
Concepções de tecnologia de graduandos do estado de São Paulo e suas implicações educacionais: breve análise a partir de	Estéfano Vizconde Veraszto Dirceu da Silva Eder Pires de Camargo

modelagem de equações estruturais	Jomar Barros Filho
Marx como referencial para análise de relações entre ciência, tecnologia e sociedade	Paulo Lima Junior Diomar Caríssimo Selli Deconto Ricieri Andrella Neto Cláudio José de Holanda Cavalcanti Fernanda Ostermann
Educação com enfoque CTS em documentos curriculares regionais: o caso das diretrizes curriculares de física do estado do Paraná	Silmara Alessi Guebur Roehrig Sérgio Camargo
EDUCAR	
A produção de raios X contextualizada por meio do enfoque CTS: um caminho para introduzir tópicos de FMC no ensino médio	Adão José de Souza Mauro Sérgio Teixeira de Araújo
JOURNAL OF TECHNOLOGY MANAGEMENT & INNOVATION	
Cooperação Internacional para o Desenvolvimento em Ciência e Tecnologia: A Participação Brasileira na Organização Européia para Pesquisa Nuclear (CERN)	Rafael Pinto Duarte
ACTA SCIENTIARUM. HUMAN AND SOCIAL SCIENCES, MARINGÁ	
Relações entre ciência, tecnologia e sociedade em livros didáticos de química	Marilde Beatriz Zorzi Sá Ourides Santin Filho
REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA (RBEF)	
Estudo do Acidente Radiológico de Goiânia no Ensino de Física Moderna	R. Meigikos dos Anjos A. Facure K. C. Damasio Macario E. M. Yoshimura J. A. P. Brage E. M. Terra H. Tompakow P. R. S. Gomes C. E. Alhanati S. N. M. Cardoso M. D. N. Santoro

	A. L. Boyd
Interação do Campo Magnético da Terra com os Seres Vivos: História da sua Descoberta	Henrique G.P. Lins de Barros Darci M. S. Esquivel
Aplicações da Ressonância Magnética Nuclear ao Estudo de Materiais Magnéticos	A.P. Guimarães
Uma Investigação Sobre a Natureza do Movimento ou Sobre uma História para a Noção do Conceito de Força	Marcos Cesar Danhoni Neves
$E=mc^2$ : Origem e Significado	Nivaldo A. Lemos
Como Não Escrever Sobre História da Física - um Manifesto Historiográfico	Roberto de Andrade Martins
A (Im)Pertinência da História ao Aprendizado da Física (um Estudo de Caso)	Penha Maria Cardoso Dias
Os Mitos dos Cientistas e suas Controvérsias	Rodrigo Moura João Batista Garcia Canalle
A Temática Ambiental e o Ensino de Física na Escola Média: Algumas Possibilidades de Desenvolver o Tema Produção de Energia Elétrica em Larga Escala em uma Situação de Ensino	Luciano Fernandes Silva Luiz Marcelo de Carvalho
Articulação Centro de Pesquisa - Escola Básica: contribuições para a alfabetização científica e tecnológica	Giselle Watanabe Caramello Roseline Beatriz Strieder Graciella Watanabe Marcelo G. Munhoz
O GPS: unindo ciência e tecnologia em aulas de física	Daniel Capella Zanotta Eliane Cappelletto Marcelo Tomio Matsuoka
REDES	
Os Estudos Sobre Ciência, Tecnologia e Sociedade e a Educação: Mais Além da Participação Pública na Ciência	Renato Dagnino Lais Fraga
REVISTA IBEROAMERICANA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD – CTS	

La ciencia desapercibida	Juan Tena
Transferencia de tecnología a través de la migración científica: ingenieros alemanes en la industria militar de Argentina y Brasil (1947-1963)	Ruth Stanley
Los entornos de la innovación	José Antonio López Cerezo
Ciencia y Sociedad Civil	John Ziman
Una cultura sin cultura. Reflexiones críticas sobre la “cultura científica”	Jean-Marc Lévy-Leblond
La mirada genética: el secuenciamiento del genoma del arroz en China	David Schleifer
“Traslación” y adaptación de técnicas. Tecnologías apropiadas y procesos de transferencia	Jesús Vega Encabo
Las TIC en la cooperación Sur-Sur: el acuerdo de libre comercio entre la India y el Mercosur	Susana Finkelievich
De “átomos para la paz” a los reactores de potencia. Tecnología y política nuclear en la Argentina (1955-1976)	Diego Hurtado de Mendoza
De la tecnología a la ética: experiencias del siglo veinte, posibilidades del siglo veintiuno	Carl Mitcham
Cultura científica y participación ciudadana: materiales para la educación CTS	Mariano Martín Gordillo
Ciência-Tecnologia-Sociedade: um compromisso ético	João Praia António Cachapuz
Cultura científica y participación ciudadana: materiales para la educación CTS	Mariano Martín Gordillo
A comunidade de pesquisa e a política de ciência e tecnologia: olhando para os países avançados	Renato Dagnino
La gobernanza tecnocientífica en la Unión Europea	Oliver Todt

Evaluación, transparencia y democracia	Eulalia Pérez Sedeño
Los problemas de la ciencia y el poder	Mario Albornoz
Innovación, tecnología y prácticas sociales en las ciudades: hacia los laboratorios vivientes	Susana Finquelievich
La apropiación política de la ciencia: origen y evolución de una nueva tecnocracia	Noemí Sanz Merino
Conocimiento científico, ciudadanía y democracia	Ana Cuevas
Epistemología popular: condicionantes subjetivos de la credibilidad	José Antonio López Cerezo
La participación pública en el contexto de los proyectos tecnológicos	Francisco Javier Gómez González Cristina Durlan Santiago Cáceres Gómez Guillermo Aleixandre Mendizábal
Innovación y tradición. Historia de la tecnología moderna	David Edgerton
Insostenibilidad: aproximación al conflicto socioecológico	Josep Lobera
Obstáculos que pueden estar impidiendo la implicación de la ciudadanía y, en particular, de los educadores, en la construcción de un futuro sostenible. Formas de superarlos	Amparo Vilches Daniel Gil Pérez Juan Carlos Toscano y Óscar Macías
“Ciencia, Tecnología y Sociedad” en la literatura de ciencia ficción	Natalia Castro Vilalta
A construção do Espaço Ibero-americano do Conhecimento, os estudos sobre ciência, tecnologia e sociedade e a política científica e tecnológica	Renato Dagnino
Del déficit al diálogo, ¿y después? Una reconstrucción crítica de los estudios de comprensión pública de la ciência	Carina G. Cortassa
Periferia y fronteras tecnológicas. Energía nuclear y dictadura militar en la Argentina	Diego Hurtado de Mendoza

(1976-1983)	
La enseñanza Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) en el entorno universitario politécnico. La metodología de la descripción de controversias en la Escuela de Minas de París	Katharina Schlierf
Radiografía de las interacciones institucionales de cooperación académica y científica entre Argentina y España	Jesús Sebastián Celia Díaz Manuel Fernández Esquinas Rosa Sancho
Importación de tecnologías capital-intensivas en contextos periféricos: el caso de Atucha I (1964-1974)	Javier R. Fernández
O Discurso do Sistema Integrado: um estudo de caso	Rodney F. de Carvalho
Tecnología misilística y sus usos duales: aproximaciones políticas entre la ciencia y las Relaciones Internacionales en el caso del V2 alemán y El Cóndor II argentino	Daniel Blinder
Los sentidos de la relevancia en la política científica	Federico Vasen
Participación militar estadounidense en la Ciencia y Tecnología de México	Guillermo Foladori
La comprensión pública de la nanotecnología en España	Javier Gómez Ferri
Ciencia, neoliberalismo y bioeconomía	Vincenzo Pavone
Átomos na política internacional	Ana Maria Ribeiro de Andrade
Cultura tecnológico-política sectorial en contexto semiperiférico: el desarrollo nuclear en la Argentina (1945-1994)	Diego Hurtado
Nuevas tecnologías: ¿para quiénes? El caso de la nanotecnología	Guillermo Boido Celia T. Baldatti
Poder político y poder tecnológico: el desarrollo nuclear español (1950-1975)	Ana Romero de Pablos

Los orígenes de la física nuclear en México	Raúl Domínguez Martínez
PRESENTACIÓN. Desarrollo nuclear en México, Brasil, España y la Argentina	Diego Hurtado Ana Romero de Pablos
<i>La Estructura de las Revoluciones Científicas</i> : cincuenta años	León Olivé
O enfoque ciência, tecnologia e sociedade (CTS) e educação física: alguns apontamentos	Camila da Cunha Nunes Adolfo Ramos Lamar Fabio Zoboli
Memoria y balance de la RICYT: lecciones aprendidas y desafíos futuros	Mario Albornoz
PRESENTACIÓN. Conocimiento científico, desastres y política pública	María Elina Estébanez
La electrónica como catástrofe silenciosa: del excepcionalismo a la evaluación de impacto social de la tecnología	Francisco Javier Gómez González Guillermo Aleixandre Mendizábal Santiago Cáceres Gómez Cristina Durlan
<b>SOCIOLOGIAS</b>	
Estudos sociais em ciência e tecnologia e suas distintas abordagens	Adriano Premebida Fabrício Monteiro Neves Jalcione Almeida

Tabela 1: Trabalhos pesquisados nas bases de dados da CAPES, do REDALYC, da RBEF e da UFSC.

A maioria dos trabalhos aqui mencionados foi encontrada pela palavra chave pesquisada em seus títulos, contudo a leitura do resumo de cada trabalho foi necessária para averiguar se havia realmente ligação entre o tema pesquisado e o trabalho encontrado. Em nenhum dos artigos vistos na pesquisa foi encontrada a proposta que estamos fazendo de uma abordagem contextual, unindo a HFC com a CTSA para tratar o tema da bomba atômica, trazendo para os alunos o conteúdo da física e da energia nuclear.

### **1.1. História e Filosofia da Ciência (HFC)**

A abordagem histórica no ensino de ciência torna-se indispensável quando se deseja contextualizar conceitos de física e destacar o fato de que a ciência é desenvolvida por

pessoas que não estão desvinculadas de sua sociedade, crenças, cultura e/ou momento histórico, visto que “a imagem clássica do cientista é de um sujeito genial que fica em uma torre de marfim isolado da sociedade.” (Cabral, 2011, p. 13)

A História e Filosofia da Ciência (HFC) entra aqui como uma importante aliada da abordagem CTSA como recurso a ser utilizado no ensino de física devido ao seu papel interdisciplinar. O estudo do conteúdo quando traz uma boa análise histórica permite perceber que a ciência faz parte de um desenvolvimento histórico, de uma cultura, de um mundo humano, sofrendo influências e influenciando por sua vez muitos aspectos da sociedade.

Não podemos descartar o processo de construção da ciência, pois mesmo os métodos e teorias que hoje são considerados ultrapassados, na sua época, eram tidos como válidos e auxiliaram o avanço da ciência. Compreender a evolução dessas teorias e os motivos das suas modificações pode ser a alternativa para a compreensão da ciência por parte de muitos estudantes, uma vez que as teorias não podem ser desvinculadas do ambiente e época em que foram formuladas.

De acordo com Matthews (1995), os alunos têm se preocupado apenas com a memorização dos conteúdos (leis e fórmulas), realização de atividades mecânicas e aplicação de questões que sugerem uma regra para resolução de problemas passados pelos professores. Como a avaliação destes alunos é feita por testes que reproduzem esses problemas, eles acabam tendo um bom desempenho, mas não têm uma aprendizagem significativa. Tornar o estudo da ciência, e em particular o da Física, mais humano é uma alternativa para minimizar o alto nível de insatisfação e analfabetismo científico em relação a esta disciplina. É a chamada educação científica que utiliza a História da Ciência para aproximar a sociedade da ciência.

Essa afirmação é também explorada por Guerra (2004, p. 226)

Para que a história da ciência cumpra o papel destacado, é necessário que, ao enfocá-la, seja ultrapassada a história factual, baseada apenas em curtas biografias dos autores das leis e das teorias atualmente aceitas. Ela será um instrumento eficaz na construção de um espaço propício à reflexão, quando, paralelamente ao estudo histórico do desenvolvimento interno dos conceitos e experimentos científicos e tecnológicos, discuta-se como o desenvolvimento desses conhecimentos se inseriu na história das sociedades. Deve-se, então, salientar as controvérsias científicas, as inquietações filosóficas dos que construíram a ciência, e também as interfaces entre esta e outras produções culturais.

Ainda segundo Matthews (1995, p. 165):

Paulatinamente, se reconhece que a história, a filosofia e a sociologia da ciência contribuem para uma compreensão maior, mais rica e mais abrangente das questões neles formuladas. Os tão difundidos programas de Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), tanto nas escolas como nas universidades, representam uma abertura importantíssima para as contribuições histórico-filosóficas para o ensino de ciências.

Entendemos que essa união da história, filosofia e sociologia da ciência com os estudos em ciência, tecnologia e sociedade permitem aos estudantes uma visão mais crítica da ciência e aproxima o aluno desta.

A proposta de grande contribuição que a HFC pode dar ao ensino é descrita de maneira bastante clara por Roberto Martins (2006, p. 24):

O estudo detalhado de alguns episódios da história da ciência é insubstituível, na formação de uma concepção adequada sobre a natureza das ciências, suas limitações, suas relações com outros domínios. Esses episódios podem mostrar grandes sucessos e também grandes fracassos do esforço humano para compreender a natureza; a contribuição titânica de alguns cientistas, acompanhada no entanto por muitos erros gigantescos das mesmas pessoas; o papel de uma multidão de pesquisadores obscuros no desenvolvimento de importantes aspectos das ciências; o processo gradual de formação de teorias, modelos, conceitos e do próprio método científico; a existência de teorias alternativas, de controvérsias, de revoluções que lançam por terra concepções que eram aceitas (por bons motivos) durante muito tempo; a permanência de dúvidas mesmo com relação a teorias bem corroboradas; a influência de concepções filosóficas, religiosas e o papel da tradição e de preconceitos injustificados no desenvolvimento das ciências; e muitos outros aspectos da dinâmica da ciência.

Não podemos confundir o conceito de estudar HFC como ferramenta para auxiliar na aprendizagem com a leitura de livros textos que trazem uma seção com este título, mas se resumem a citar nomes, datas em informações isoladas de um contexto. Muitas vezes estas seções trazem algum cientista como ícone da súbita criação de alguma teoria como se ele não tivesse tido auxílio ou gastado tempo na sua elaboração.

É importante que os estudantes saibam como se deu o processo de criação e desenvolvimento das teorias, pois muitas vezes as concepções prévias que eles trazem são as mesmas das que algumas pessoas, tidas como ícones da ciência em seus tempos, tinham e que se mostraram válidas e respeitadas em suas épocas. A percepção das causas que levaram àquelas ideias a serem modificadas representará para o educando uma forma de apreensão do conteúdo mais forte e clara do que a simples exposição das leis e teorias da forma que são aceitas atualmente.

A utilização da HFC para a melhoria do aprendizado é uma ideia que já vem sendo implementada nos currículos através dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN). Podemos afirmar essa concepção com a leitura do PCN + Ensino Médio da área de Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias (2002, p. 67):

Compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época. Compreender, por exemplo, a transformação da visão de mundo geocêntrica para a heliocêntrica, relacionando-a às transformações sociais que lhe são contemporâneas, identificando as resistências, dificuldades e repercussões que acompanharam essa mudança.

Compreender o desenvolvimento histórico dos modelos físicos para dimensionar corretamente os modelos atuais, sem dogmatismo ou certezas definitivas.

Compreender o desenvolvimento histórico da tecnologia, nos mais diversos campos, e suas consequências para o cotidiano e as relações sociais de cada época, identificando como seus avanços foram modificando as condições de vida e criando novas necessidades. Esses conhecimentos são essenciais para dimensionar corretamente o desenvolvimento tecnológico atual, através tanto de suas vantagens como de seus condicionantes. Reconhecer, por exemplo, o desenvolvimento de formas de transporte, a partir da descoberta da roda e da tração animal, ao desenvolvimento de motores, ao domínio da aerodinâmica e à conquista do espaço, identificando a evolução que vem permitindo ao ser humano deslocar-se de um ponto ao outro do globo terrestre em intervalos de tempo cada vez mais curtos e identificando também os problemas decorrentes dessa evolução.

Perceber o papel desempenhado pelo conhecimento físico no desenvolvimento da tecnologia e a complexa relação entre ciência e tecnologia ao longo da história. Muitas vezes, a tecnologia foi precedida pelo desenvolvimento da Física, como no caso da fabricação de lasers, ou, em outras, foi a tecnologia que antecedeu o conhecimento científico, como no caso das máquinas térmicas.

Por parte dos alunos pode haver alguma resistência à implantação da História e Filosofia da Ciência como mecanismo para auxiliar na aprendizagem, pois estão acostumados ao ensino tradicional, com memorização de fórmulas, apresentação do conteúdo de forma pronta e não passível de modificações ou discussões, e resolução de problemas com mesma característica dos que serão cobrados em avaliações. Com a utilização da HFC o aluno é posto a pensar e refletir acerca da construção da ciência.

## **1.2. Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA)**

A ciência está interessada em reunir conhecimentos e organizá-los. Para muitos, a ciência aplicada a uma finalidade é conhecida como tecnologia. No século XX, a Corporação de

Tecnologias Unidas dos Estados Unidos dizia aos quatro cantos do mundo: “Éticamente a tecnologia é neutra, não há nada bom nem mau inerentemente a ela. É simplesmente um instrumento, um servente para ser refinado, dirigido e utilizado por pessoas para qualquer propósito que queiram conseguir” (Bazzo, 1998, p. 71). A tecnologia, portanto, leva os humanos a usarem o conhecimento científico com propósitos práticos, e fornece as ferramentas necessárias para que os cientistas avancem mais ainda em suas explicações. Esse pensamento traz a concepção de que o desenvolvimento da tecnologia é produto das investigações científicas, entretanto sem o desenvolvimento tecnológico não haveria melhoria dos equipamentos necessários ao desenvolvimento da ciência, mas também sem o avanço em pesquisas não seria possível desenvolver a tecnologia. Há aqui uma dependência recíproca.

Como afirma Cabral (2011, p. 27), “a tecnologia não é neutra: há interesses, crenças, valores envolvidos; há relações de poder, um tempo, uma história”. Pode-se citar, como exemplos, que quando o homem começou a aperfeiçoar instrumentos de caça ele o fez sem nenhum conhecimento científico, assim como quando dominou a produção de fogo sem conhecer os fundamentos teóricos da combustão; ou ainda que os estudos sobre termodinâmica só avançaram após a criação da máquina a vapor.

Atualmente, a tecnologia é vista, por algumas pessoas, como vilã em alguns fatos, como o aumento do aquecimento global. Na divulgação feita pela mídia é comum vermos a culpa desse fenômeno ser colocada na industrialização desenfreada, o excesso de veículos automotores e indústrias que poluem sem se preocupar com o meio ambiente, visando apenas lucros. Devemos perceber, porém, que esse fenômeno de agravamento do aquecimento global, e tantos outros, ocorrem somente por causa da presença do ser humano. Somos nós, seres humanos que fazemos uso dessa tecnologia e somos nós os responsáveis pela maneira como ela é empregada.

Julgar a tecnologia pode não ser algo trivial, como destaca Bazzo (2000, p. 03):

É importante ter o cuidado de, quando nos dispusermos a falar em julgar os valores, se bons ou maus, da tecnologia, ter realmente “juízo” para não cometermos injustiças e não cairmos nas análises superficiais de colocar a tecnologia como má ou boa, numa atitude cética de nos colocarmos como tecnofanáticos ou tecnocatastróficos.

Os tecnofanáticos propõem que quanto menos restrições haja para o desenvolvimento tecnológico, mais a sociedade irá se desenvolver. Os tecnocatastróficos analisam apenas os danos que a tecnologia causa à natureza e ao próprio ser humano, e propõe não apenas

restrições ao desenvolvimento e uso da tecnologia, mas também a total eliminação dessa prática.

Tomar uma posição sobre a utilização da tecnologia não pode, então, ser baseada simplesmente no que é divulgado pela mídia. Mas também, não podemos acreditar que ela é a solução para todos os nossos problemas. Muitas vezes, a ciência e a tecnologia também são encaradas como as bases para o desenvolvimento político, econômico e social. São elas que garantem a sobrevivência do homem no mundo capitalista e globalizado em que nos encontramos. Problemas sociais, desastres naturais ou catástrofes provocadas pelo homem impõem à ciência a busca por soluções destes agravantes e esta busca só é possível mediante o avanço tecnológico. Bazzo (1998, p. 69) destaca que:

É inegável a contribuição que a ciência e a tecnologia trouxeram nos últimos anos. Porém, apesar desta constatação, não podemos confiar excessivamente nelas, tornando-nos cegos pelo conforto que nos proporcionam cotidianamente seus aparatos e dispositivos técnicos. Isso pode resultar perigoso porque, nesta anestesia que o deslumbramento da modernidade tecnológica nos oferece, podemos nos esquecer que a ciência e a tecnologia incorporam questões sociais, éticas e políticas.

É comum não percebermos que a sociedade não é apenas beneficiada pela ciência, mas também é a fonte propulsora para o desenvolvimento de pesquisas. Durante o período das grandes navegações no século XVI, e até antes disso, por exemplo, foi necessário descobrir uma maneira de fazer os alimentos durarem mais tempo sem que estragassem devido ao grande tempo que se passava no mar e daí veio a busca pelas especiarias. Outro exemplo ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, quando os ingleses estavam sofrendo perdas devido aos ataques aéreos da Alemanha e, então, desenvolveram um método para detectar a aproximação de aeronaves utilizando ondas de rádio, criando assim o radar. Contudo, a visão de que a sociedade e a ciência caminham lado a lado nem sempre esteve clara para alguns cientistas, como mostra Cabral (2011, p. 14):

... havia um consenso sobre a liberdade e autonomia da ciência em relação à sociedade que começou no Iluminismo, continuou nos estudos da sociedade, denominado de positivismo, e permanece impregnado nas mentes de muitos cientistas no final do século XX. A valorização do conhecimento científico baseado na observação dos fenômenos para entender a realidade com ela é colocava a ciência acima da sociedade. Os cientistas acreditavam que a acumulação pura e simples de conhecimentos científico-tecnológicos seria suficiente para garantir o progresso econômico e social de todos. Desse modo, essa visão de ciência introduziu a ideia de progresso como um

desenvolvimento linear que começa com o avanço do conhecimento que transborda e se espalha para a sociedade, beneficiando a todos.

A sociedade não é apenas um setor que tende a observar e usufruir das pesquisas científicas e do desenvolvimento tecnológico; ela é tão importante para a tecnologia quanto é a ciência, bem como para a ciência como é a tecnologia. Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) formam uma espécie de tripé sobre o qual está erguida toda e qualquer relação social, pesquisa científica ou avanço tecnológico.

Após o período da Segunda Guerra Mundial, quando o mundo via alguns resultados do desenvolvimento tecnológico como as bombas nucleares, as contaminações por derramamento de material nuclear de reatores ou depósitos nucleares, o desenvolvimento armamentista dos Estados Unidos durante a guerra do Vietnã e a Guerra Fria, e o acidente com um petroleiro na Inglaterra que espalhou uma grande quantidade deste combustível nas praias, tornaram-se mais evidentes os problemas ambientais. Assim, percebeu-se que o ambiente em que vivemos também influi e é influenciado pela sociedade, pela ciência e pela tecnologia, ampliando a relação de interdependência que é chamada de CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente).

Frente aos impactos ambientais, a população demonstrava o medo de a raça humana ser exterminada pela sua própria criação (síndrome do Frankenstein). Como resposta a esta preocupação, desenvolveu-se na Europa e nos Estados Unidos, no fim da década de 1960 e início da década de 1970, os estudos CTS, buscando compreender os aspectos sociais da ciência e da tecnologia e demonstrando uma preocupação tanto com aspectos político-econômicos como com aspectos culturais, éticos ou ambientais. A abordagem CTS mudou a concepção tradicional do contexto científico-tecnológico, segundo a qual quanto mais desenvolvimento científico houver, maior será o bem estar social.

No início do desenvolvimento dos estudos CTS haviam discussões sobre este tema em todo o mundo, principalmente nos países da América do Norte e da Europa. Apesar de terem uma origem comum, as concepções desses estudos nos dois continentes foram diferenciadas. Desta maneira, a origem das discussões sobre CTS foi dividida em duas tradições: a tradição europeia, que tinha uma ênfase maior na ciência, na explicação da origem e das mudanças das teorias científicas, e a tradição americana, que tinha um caráter mais prático ou social com ênfase maior na tecnologia.

Atualmente, os pesquisadores não definem mais essa divisão e os estudos em ciência, tecnologia e sociedade abrangem programas que enfatizam a dimensão social da ciência e da tecnologia.

Bazzo, Von Linsingen e Pereira (2003, p. 127) desmembram o estudo CTS em três direções:

- No campo da pesquisa: os estudos CTS são colocados como uma alternativa à reflexão acadêmica tradicional.
- No campo da política pública: defendem a criação de diversos mecanismos democráticos que facilitem a abertura de processos de tomada de decisão em questões pertinentes à política científico-tecnológica.
- No campo da educação: a nova imagem tem propiciado aparição de materiais CTS no ensino médio e superior.

A primeira direção aborda a ciência com interesses sociais, visando compreender as implicações sociais do conhecimento científico.

A segunda direção visa as consequências sociais e ambientais da mudança científico-tecnológica e por isso deve ser assunto de domínio público.

A terceira direção é uma aplicação dos estudos CTS na área educacional em que já são encontrados diversos currículos de ciências que abordam esse tema. Além dos currículos de ciências, também tem abrangido as disciplinas das ciências sociais e humanidades, entre elas filosofia, história da ciência e economia.

Ao analisar trabalhos na área de Ensino de Ciências através de trabalhos apresentados nos Encontros de Pesquisa e Ensino de Ciências (ENPECS) entre 1997 e 2005, Strieder (2008, p. 29) percebe que a compreensão sobre o que CTS ou CTSA não é única:

A partir desse levantamento é possível afirmar que, também aqui no Brasil, o lema CTS abarca uma série de sentidos e significados. Há uma compreensão muito diversificada do que seja uma abordagem CTS, o que envolve, por exemplo: contextualizar o conhecimento científico - relacionar com o cotidiano; compreender a natureza da ciência e o trabalho científico; compreender as relações entre a ciência e a tecnologia, entre a tecnologia e a sociedade ou discutir questões relacionadas ao meio ambiente; formar cidadãos - informar os direitos e, contribuir para que os educandos além de compreender a atividade científico-tecnológica, estejam preparados para participar, responsavelmente, em decisões que envolvem a mesma.

Apesar da diversidade de interpretações, acreditamos que a tendência de trabalhar um tema que tenha relação com a realidade do aluno dará uma motivação maior para a

compreensão e participação do estudante. Trabalhar em sala de aula com a ciência inserida num contexto histórico-social está de acordo com a proposta que apresentamos nesse trabalho e pensamos ser uma alternativa que contextualiza o conhecimento a ser trabalhado, permitindo as abordagens em outros campos, como afirma Pinheiro *et. al.* (2009, p. 10):

A importância de se discutir com os alunos sobre os avanços da ciência e da tecnologia, suas causas, consequências, interesses econômicos e políticos, de forma contextualizada, está no fato de que devemos conceber a ciência como fruto da criação humana. Por isso ela está intimamente ligada à evolução do ser humano, desenvolvendo-se permeada pela ação reflexiva de quem sofre/age as diversas crises inerentes a esse processo de desenvolvimento.

A visão social da ciência traz consigo a desmistificação de gênios e mostra ao aluno que existia algum fenômeno a ser explicado por trás da busca deste ou daquele cientista e que esta busca, quase sempre, era feita simultaneamente por mais de um cientista. A utilização do contexto histórico-social permite, então, que os fatos históricos não sejam distorcidos e permite que o professor mostre que a ciência tem como objetivos, que não são os únicos, a busca de soluções para problemas e o desenvolvimento de tecnologias no contexto social do cientista.

Trazer esse contexto para sala de aula tende a extrapolar os limites deste espaço físico e desenvolver a criticidade dos alunos para que eles possam participar da tomada de decisões em seu meio social com uma bagagem de informações que antes não possuía. A sala de aula deixa então de ser um ambiente no qual as informações são unilaterais, passadas dos professores para os alunos, e se torna um espaço de discussões.

O objetivo do professor é promover uma atitude criativa e crítica, ao invés de conceber o ensino como um processo de transmissão de informações por meio de “macetes” e de memorização. Para que se atinja este tipo de formação, será necessária uma nova postura perante os conteúdos a serem estudados, afinal, a pretensão do ensino CTS é buscar e incentivar a participação dos estudantes e minimizar a participação do professor. (PINHEIRO *et.al.* 2007, p. 81)

Dentro da possibilidade de discutir conteúdos com os alunos, alguns professores tendem a não adotar a abordagem CTS (ou CTSA) em suas aulas, visto que podem apresentar uma série de dificuldades, como aponta Acevedo Diaz (2002, p. 3, apud Oliveira, 2006, p. 30):

1- Sua formação é basicamente disciplinar para abordar algo que é essencialmente multidisciplinar;

- 2- Certo temor de perder sua identidade profissional, o que em parte está relacionado com a percepção que tem das finalidades do ensino de Ciências;
- 3- Suas crenças sobre a natureza das Ciências, tanto os aspectos epistemológicos quanto os sociológicos;
- 4- O caráter mais aberto, dialético e provisório dos materiais curriculares em CTS e a própria avaliação das questões em CTS, o que dá lugar a certa insegurança por parte dos professores;
- 5- A pouca familiaridade da maior parte dos professores com muitas das estratégias de ensino-aprendizagem e com os critérios, normas, técnicas e instrumentos de avaliação que são usados no ensino em CTS;
- 6- Determinadas estratégias que são adequadas e estimulantes para a maioria dos alunos exigem demais dos professores;
- 7- Outras resistências comuns a todas as novidades devido ao caráter geralmente conservador dos sistemas educativos.

Para os professores que se dispõem a deixar de lado qualquer forma de resistência ou dificuldade apresentada acima, as discussões promovidas em suas aulas tendem a tornar o estudo de ciências mais atrativo para os alunos, como afirma Comegno (2007, p. 39):

Novos fatores emergentes denotam a necessidade de um currículo diferenciado em educação, que seja mais sensível ao caráter social da ciência e da importância crescente da tecnologia. Entre esses fatores está a diminuição do interesse dos alunos por ciência, o aumento da consciência social sobre a preservação do meio ambiente e os efeitos positivos e negativos das novas tecnologias.

Estas características de discutir sobre ciência através da abordagem CTSA para promover um aprendizado mais crítico e dar capacidade de o aluno interferir em seu meio social comungam com a pedagogia freireana adotada neste trabalho e podem se complementar durante as aulas:

Entendemos que a articulação de tais propostas educacionais seja um ganho para ambas: para o enfoque CTS por lhe proporcionar uma base educacional sólida e coerente (algo nem sempre explicitado nas abordagens CTS) e, por outro lado, para a pedagogia e método freiriano (e seus desdobramentos no ensino de ciências) por oportunizar a abordagem de temas sempre atuais de dimensão social, política e econômica, particularmente no âmbito do ensino de ciências e tecnologia. (NASCIMENTO e LINSIGEN, 2006, p. 97)

E ainda,

A abordagem CTS articulada à perspectiva freireana, visa propiciar a base formativa necessária para tornar possível a compreensão crítica e a intervenção da sociedade, no que se refere a questões sociais que estejam

relacionadas ao desenvolvimento científico-tecnológico e que aflijam a sociedade no presente momento histórico. (STRIEDER, 2008, p. 62)

No próximo capítulo trataremos da pedagogia de Freire para compreendermos melhor os aspectos que serão utilizados durante a aplicação da Sequência Didática.

## CAPÍTULO 2

### REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1. Pedagogia de Paulo Freire

A proposta de educação social, na qual o jovem terá ferramentas para participar democraticamente da tomada de decisões e possuirá conhecimentos científicos para opinar em situações vivenciadas por ele, favorece associar os estudos de CTS com a pedagogia de Paulo Freire. Com esse objetivo, a “problematização” e a “dialogicidade” freireana podem utilizar o enfoque CTSA como tema gerador e, a partir dele, trabalhar situações de relevância social que possam ajudar a transformar a realidade dos educandos, tirando-os da posição de oprimidos por um sistema tecnocrata, em que possuem uma consciência real efetiva, e ajudando-os a possuir uma concepção crítica da realidade, atingindo uma consciência máxima possível.

Na prática escolar, segundo a proposta de Freire, o educando deve perceber que há uma interação social e deve compreender e se apropriar da significação dos conteúdos. O professor tem papel diretivo, porém sem autoritarismo e sem licenciosidade dos alunos. Nesse processo o aluno deve questionar a fim de buscar o conhecimento, a pergunta é a própria essência do conhecer. Não há respostas definitivas, o importante é o perguntar que leva ao conhecer que também não é definitivo. Nas palavras de Freire (2014, p. 108):

Existir, humanamente, é ‘pronunciar’ o mundo, é modificá-lo. O mundo ‘pronunciado’, por sua vez, se volta problematizado aos sujeitos ‘pronunciantes’, a exigir deles novo ‘pronunciar’. Não é no silêncio que os homens se fazem, mas na palavra, no trabalho, na ação-reflexão.

Durante o diálogo, enquanto trabalha os saberes dos educandos, o professor pode opinar sobre questões da mais variada natureza – políticas, econômicas, sociais, culturais, históricas – buscando desenvolver uma capacidade crítica de intervir na realidade e não simplesmente se adaptar a ela. Não deve criar desrespeito por governos, populações ou natureza, mas, sim, utilizar um projeto político-pedagógico no qual o pensamento freireano de que “mudar é difícil, mas é possível” possa ser trabalhado para superação de situações desumanizantes. (Freire, 1997)

Os conteúdos a serem ensinados devem ter relação com a cultura do grupo que está aprendendo determinado tema. O cotidiano do aluno é o ponto de partida para a pedagogia freireana. Durante a aplicação dessa pedagogia, Freire observava a comunidade e dialogava

com ela a fim de conhecer sua realidade e, a partir desta, buscava reinterpretar os dizeres de seus alunos para mostrar-lhes uma realidade que até então podia não estar sendo percebida. Usando como alternativa mostrar imagens do cotidiano falado pelos educandos, o professor tem o papel de problematizar uma discussão na qual os alunos vão contando suas histórias de vida, suas experiências, suas impressões do mundo que os cerca. A partir desse momento Freire trazia uma palavra relacionada a este cotidiano da comunidade na qual estava buscando a alfabetização e os educandos aprendiam o código silábico ao mesmo tempo em que conversavam sobre suas vidas.

Ao sair de seu mundo e voltar a analisá-lo por um novo ângulo, com um novo olhar, o educando começa a desenvolver uma consciência que não é mais ingênua e o desenvolvimento desta consciência, agora crítica, permitirá que os educandos possam intervir em sua realidade e transformá-la, tornando-os sujeitos de sua própria história. Vale lembrar que Freire pressupõe que o aluno deve buscar o conhecimento e, portanto, a educação está centrada nele, como visto nesta passagem:

Uma de minhas tarefas centrais como educador progressista é apoiar o educando para que ele mesmo vença suas dificuldades na compreensão ou na inteligência do objeto e para que sua curiosidade, compensada e gratificada pelo êxito da compreensão alcançada seja mantida e, assim, estimulada a continuar a busca permanente que o processo de conhecer implica. Que me seja perdoada a reiteração, mas é preciso enfatizar, mais uma vez: ensinar não é transferir a inteligência do objeto ao educando, mas instigá-lo no sentido de que, como sujeito cognoscente, se torne capaz de entender e comunicar o entendido (FREIRE, 1997, p. 134-135).

Desta forma, o professor não tem papel de detentor de algum conhecimento visando transferi-lo ao educando, mas deve participar dos diálogos para despertar sempre a curiosidade do aluno, pois somente através dessa que este irá aprender algo.

Apesar de ter sido proposto e aplicado, sendo validado diversas vezes durante um contexto social diferente do que nos encontramos agora, o método proposto por Freire é ainda eficaz no contexto atual, pois foi se adequando à realidade de cada época, como podemos ver na afirmação abaixo:

(...) posteriormente o Método Paulo Freire passou por uma reestruturação; deixou de ter uma visão 'romântica' de educação, mas sem perder o compromisso social da aprendizagem na ação alfabetizadora. Tal reestruturação foi resultado de revisões, mudanças e análises do cotidiano escolar em vista de avaliações permanentes no método. No entanto, apesar das modificações experimentadas, seu método, intrinsecamente dialógico e

ao mesmo tempo problematizador, não perdeu o objetivo maior de formar pessoas para o enfrentamento da realidade. (PEREIRA, 2006, p. 72-73)

Trazer o método utilizado por Freire para a escola do século XXI, quando os alunos possuem contato com inúmeras tecnologias e fontes diversas de informação, nos causou um desconforto devido à interpretação que se pode ter de “o que é o cotidiano do aluno nos dias de hoje?” Segundo o dicionário virtual Aurélio de língua portuguesa, a palavra *Cotidiano* significa o mesmo que *Quotidiano*, que traz como significados:

1. Conjunto das ações praticadas todos os dias e que constituem uma rotina.
2. O que acontece todos os dias.
3. COTIDIANO.
4. De todos os dias; que acontece diariamente.
5. Que é muito comum ou banal.

Analisando a visão de cotidiano relacionada com o Ensino de Física, Pierson (1997, apud Toti e Pierson, 2010, p. 528) afirma que:

o cotidiano aparece como organizador de um referencial comum para retirada do ‘material’ necessário à construção das estruturas de pensamento desejáveis no Ensino de Física.

Analisando as ações que podem ser diárias, ou comuns, aos jovens estudantes de hoje, podemos encontrar, muitas vezes até na sala de aula, o uso de celulares com acesso à internet, ou ainda a existência de computadores em suas casas ou, em alguns casos, jovens que se interessam em assistir telejornais. Independente da forma, o acesso à informação nos dias de hoje é imensamente maior do que na década de 1970, quando Freire desenvolvia o que veio a ser conhecido como seu método de ensino. O próprio Freire reconhecia que a passagem do tempo e a mudança que ocorreu na sociedade traziam como necessidade adaptações para aqueles que buscassem usar seu método. Numa entrevista concedida a Nilcéia Lemos Pelandré:

(...) Hoje a gente tem esses conhecimentos em função dos estudos sociolinguísticos, que não havia na época. A gente só tem que refazer ou melhorar a questão da palavra, a questão da não sintonia necessária entre a palavra falada e a palavra escrita e os estudos recentes. Na época eu não dispunha das grandes fontes indispensáveis ao conhecimento do processo de alfabetização que temos hoje. Eu tinha referência, apenas, de Piaget. Mas eu não lia, não conhecia Vygotsky. Eu conheço essa gente hoje, não conhecia há 30, 40 anos. (...) Então, quando se fazem certas críticas sobre mim, dizem,

por exemplo, que um dos meus equívocos teria sido o de partir de palavras. Foi uma pouca explicitação de minha parte, porque no fundo eu partia de discursos. Não importa que eu tivesse me fixado no que a gente chamou de palavras geradoras, porque as palavras geradoras estavam dentro do discurso. Segundo, é que quando eu propunha codificações, ou cujo debate precedia sempre a decodificação da palavra, aquela palavra saía inúmeras vezes num discurso decodificador que é a leitura da codificação. Então, no fundo, a alfabetização estava se dando na base da compreensão da sentença, na base da compreensão dum juízo inteiro e não da palavra, como se ela fosse uma totalidade absoluta, o que não é (PELANDRÉ, 1998, p. 304-305).

Para este trabalho usamos a *palavra geradora* no mesmo sentido explicitado acima, estando ela presente em um discurso que foi problematizado pelo professor. Não procuramos alfabetizar adultos, como fazia Freire em seu trabalho – até porque os alunos com os quais trabalhamos estavam cursando o último ano do ensino médio na escola que aplicamos a Sequência Didática –, mas sim trazer um conteúdo que ainda permanece adormecido, não muito conhecido dos estudantes: a Física Moderna e Contemporânea. Muitos jovens e adultos já ouviram falar nela, conhecem algum produto tecnológico criado a partir desse campo do saber, ou vêem nos meios de comunicação consequências do avanço desse conhecimento, mas esse é um conteúdo ainda pouco presente nos currículos das escolas do ensino médio.

Toti e Pierson (2010) fizeram uma análise da Física do cotidiano - os conhecimentos de Física presentes no trabalho de estudantes trabalhadores - e afirmam:

Caracterizar o cotidiano é algo essencial, numa perspectiva que transcende uma visão de senso-comum, de espaço rotineiro, mecânico, mas o reconhece como espaço onde o sujeito deve iniciar o seu processo de apropriação do mundo a sua volta, isso implica, para o sujeito, numa continuidade entre a cultura primeira e a cultura elaborada (TOTI e PIERSON, 2010, p. 529)

O *cotidiano* do aluno trazido para esta discussão foi, então, permeado da realidade na qual ele estava inserido: um mundo inundado de fontes de informação a qual se pode ter acesso através de qualquer meio de comunicação. A própria passagem do tempo traz consigo modificações na sociedade e Freire já mostrava que o ser humano devia estar inserido nesta sociedade, consciente de sua existência:

Na medida em que o homem cria, recria e decide, vão se formando as épocas históricas. E é também criando, recriando e decidindo como deve participar nessas épocas. É por isso que obtém melhor resultado toda vez que, integrando-se no espírito delas, se apropria de seus temas e reconhece suas tarefas concretas.

(...) Uma época da história apresentará uma série de aspirações, de desejos, de valores, em busca de sua realização. Formas de ser, de comportar-se, atitudes mais ou menos generalizadas, das quais somente os visionários que se antecipam têm dúvidas e frente às quais sugerem novas fórmulas. (FREIRE, 1979, p. 64)

O ser humano que está vivendo agora no século XXI pode não estar ciente do funcionamento tecnológico, político, científico ou social do meio no qual está inserido, mas ele os conhece, sabe da utilidade de equipamentos, benefícios que chega a ele através de pesquisas científicas, avanços alcançados que são noticiados pelos meios de comunicação, alterações políticas durante transições de governo ou decisões que chegam de algum modo ao seu conhecimento, pois implicam diretamente sobre a população. Não há homens isolados aos quais as informações não estejam chegando e é através da curiosidade que surge durante uma conversa, um diálogo que seja conduzido com este objetivo, que o professor pode ajudar no despertar de uma consciência crítica.

O avanço científico que vivemos não afasta o pensamento freireano, o qual o via como algo a ser superado pela educação:

A um avanço tecnológico que ameaça milhares de mulheres e de homens de perder seu trabalho deveria corresponder outro avanço tecnológico que estivesse a serviço do atendimento das vítimas do progresso anterior. Como se vê, esta é uma questão ética e política e não tecnológica... Não se trata, acrescentemos, de inibir a pesquisa e frear os avanços, mas de pô-los a serviço dos seres humanos. (FREIRE, 1997, p. 130-131)

E ainda,

Se a educação não conseguir fazer a mediação dialógica necessária, sempre, entre o aprendizado pedagógico, tecnológico e científico, certamente deixará de cumprir seu papel, ainda mais, o caráter excludente da educação no mundo do trabalho tecnologicado. Se a distância entre a alfabetização e tecnologia for diminuída, não estaremos apenas diminuindo o analfabetismo absoluto e o dito funcional, como também possibilitando o redimensionamento do trabalho, como trabalho mais humanizado e a promoção de uma cidadania plena. (PEREIRA, 2006, p. 80)

Portanto, a educação humanizadora proposta por Freire pode trazer, para aqueles que estão interessados em aprender, uma visão mais ampla do mundo, no qual podem modificar suas histórias e viver a cidadania sem que haja supressão de seus pensamentos ou ideias. Algumas categorias presentes no ideário freireano foram analisadas e comparadas em momentos temporais distintos e descritos por Pereira (2006, p. 131) no quadro abaixo:

<b>Método e categoria</b>	<b>Décadas de 50 a 80</b>	<b>Décadas de 90 a 2005</b>
<b>Método</b>	Método silábico. As palavras eram construídas a partir de uma relação intrínseca entre o mundo do aluno e o contexto social e antropológico em que viviam (contextualização). Fontes básicas: marxismo, fenomenologia.	Nova perspectiva a partir de seu encontro com a psicogênese da leitura e da escrita, acrescentando novas pesquisas na área, com as quais entrou em profundo diálogo, sem perder a fundamentação teórica anterior.
<b>Diálogo</b>	Categoria com forte presença na prática educativa freireana, bem como nos livros analisados.	Categoria ainda presente, e com grande ressonância na atualidade na prática de formação do IPF.
<b>Alienação</b>	Categoria muito presente nas discussões promovidas por Paulo Freire, com especial atenção pelos formadores a uma categoria muito utilizada, resultado do paradigma político da sociedade vigente da época.	Categoria ainda presente, já que a formadora por diversas vezes nos fala sobre a importância dos professores assumirem uma postura educativa que fortaleça a tomada de consciência de seus alunos de EJA. No entanto, a categoria alienação, nessa nomenclatura, fora pouca mencionada pela pesquisada.
<b>Conscientização</b>	Categoria muito utilizada na prática de formação freireana nas décadas 50/70. Toda ação educativa deveria, por tese, resultar na tomada de consciência dos alfabetizando.	Categoria presente. Há todo momento a pesquisada ressalta a importância da tomada de consciência por parte dos professores e dos alunos sobre a realidade em que vivem.
<b>Categorias dicotômicas</b>	Forte conotação das categorias dicotômicas resultado da situação de opressão e alienação em que viviam as pessoas, nas décadas apontadas acima.	As categorias dicotômicas, principalmente opressor X oprimido, educação bancária X educação libertadora: sujeito X objeto, poucas vezes foram mencionadas pela pesquisada. Por outro lado, a categoria professor X alunos ainda está muito presente no

		seu discurso.
<b>Formação política do Educador</b>	Baseado nas leituras feitas, pudemos constatar que a formação política do educador sempre foi uma preocupação constante de Paulo Freire, já que enfatizava, a todo momento, a tomada de consciência dos alfabetizando, e isto só poderia ocorrer se houvesse uma postura assumida pelo educando, pela causa dos excluídos.	Categoria presente. Percebe-se a atualidade e a necessidade, por parte da pesquisada, de investir ainda mais na aplicação dessa categoria. Embora a formação política ainda esteja muito latente no discurso da formadora do IPF, a mesma também acrescenta a necessidade de uma formação continuada.

Quadro 1 – Quadro comparativo de método e categorias freireanas em dois tempos históricos (PEREIRA, 2006, p. 131)

A construção deste quadro, segundo a autora, se deu a partir da leitura de obras de Paulo Freire escritas nas décadas de 60/70, bem como dos anos 90 até o momento da pesquisa (2005) e uma entrevista feita com uma das coordenadoras do Instituto Paulo Freire (IPF). De sua análise, podemos concluir que mesmo após as mudanças sociais, políticas, históricas, científicas que ocorreram desde a proposta feita por Freire, até os dias atuais, ainda é possível aplicar sua pedagogia visando a obtenção de uma formação histórico-social nos nossos alunos.

Esta formação está apresentada nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCN+), os quais possuem semelhanças com a pedagogia freireana e tratam do cotidiano do aluno como algo primordial, como se pode ver no texto abaixo:

Para que todo o processo de conhecimento possa fazer sentido para os jovens, é imprescindível que ele seja instaurado por meio de um diálogo constante entre alunos e professores, mediado pelo conhecimento. E isso somente será possível se estiverem sendo considerados objetos, coisas e fenômenos que façam parte do universo vivencial do aluno, seja próximo, como carros, lâmpadas ou televisões, seja parte de seu imaginário, como viagens espaciais, naves, estrelas ou o Universo. Assim, devem ser contempladas sempre estratégias que contribuam para esse diálogo. Como exemplo, podem ser utilizados os meios de informação contemporâneos que estiverem disponíveis na realidade do aluno, tais como notícias de jornal, livros de ficção científica, literatura, programas de televisão, vídeos, promovendo diferentes leituras e/ou análises críticas [...]. (PCN+, 2002, p. 83)

Neste trecho podemos ver que as diretrizes oferecidas pelo governo para guiar o modo como se dará o ensino de Física nas escolas do Ensino Médio preveem que o diálogo exista e que o cotidiano do aluno é sim aquele que é vivido por ele, mas não é feito somente de coisas que ocorrem em seu entorno, no sentido de dimensão espacial, mas sim os acontecimentos aos quais ele presencia, que fazem parte de sua realidade, mesmo que seja através de um meio de comunicação.

A problematização é, junto com a dialogicidade, um conceito freireano que buscamos utilizar para promover o aprendizado por parte dos educandos. Mas devemos ter cuidado para não confundir *problematizar* com *perguntar*. Apesar de ser realmente uma pergunta, a problematização traz consigo um conteúdo não conhecido do estudante e que deve despertar nesse a curiosidade de procurar responder a esta pergunta. Apenas a partir desta curiosidade que o estudante conseguirá alcançar o conhecimento crítico. Como afirma Muenchem,

O papel do professor problematizador não é descrever os conceitos/conteúdos e sim desvelá-los para que os educandos queiram conhecer. Entende-se que a problematização é uma forma de desvelamento, é ela que provoca a curiosidade, o querer conhecer. (2010, p. 158)

E ainda,

Em síntese, a problematização pode possibilitar que os educandos tornem-se críticos das próprias experiências, interpretando suas vidas, não apenas passando por elas. (ibid. p. 160)

Assim, não se pretende com esta proposta reproduzir o ensino tradicional, no qual os conceitos e conteúdos são trazidos pelo professor para os alunos, como se eles nada soubessem e sim que eles busquem, a partir da curiosidade, entender e conhecer o tema trabalhado.

## **2.2. Os Três Momentos Pedagógicos (TMP)**

A dinâmica didático-pedagógica conhecida como Três Momentos Pedagógicos foi disseminada no início dos anos 1990 aqui no Brasil devido à publicação de duas obras de Demétrio Delizoicov e José André Peres Angotti: os livros “Física” e “Metodologia do Ensino de Ciências”, publicados em 1990 como partes da Coleção Magistério – 2º Grau, em uma tentativa de contribuir com a melhoria da qualidade do ensino do 2º grau. Estas obras fizeram parte de alguns programas nacionais para melhoria do ensino e também de

bibliografias de editais de concursos públicos na área de magistério e de cursos de licenciatura em ciências.

Os Três Momentos Pedagógicos (TMP) podem ser considerados como prática pedagógica, conforme afirma Muenchen (2010, p. 101, apud Pierson, 1997, p. 101):

No processo de apropriação e incorporação dos elementos freirianos nos projetos de ensino de Ciências, os momentos pedagógicos — Problematização Inicial, Organização do Conhecimento e Aplicação do Conhecimento — são, juntamente com os conceitos unificadores, elementos desenvolvidos e que passam a ter presença marcante tanto nas propostas de intervenção quanto nas investigações e publicações de seus pesquisadores.

A relação direta e possível entre a pedagogia freireana e sua aplicação via os TMP deverá aparecer em cada encontro desenvolvido na Sequência Didática, pois é entendido neste trabalho que esta relação é fundamental para que consigamos desenvolver a consciência crítica dos alunos. A dialogicidade proposta por Freire deve estar presente em cada um dos momentos para que seja alcançado o objetivo da proposta. No primeiro momento, a *Problematização Inicial*, o tema a ser trabalhado é trazido a partir do conhecimento possuído pelos estudantes e então é problematizado, visando que estes comecem a refletir sobre o que sabem (e, principalmente, o que não sabem) do tema. A necessidade, e principalmente a curiosidade, de responder aos questionamentos feitos pelo professor leva o estudante à aquisição de novos conhecimentos. No segundo momento, a *Organização do Conhecimento*, o diálogo entre os estudantes, mediado pelo professor, promove a discussão ampla do tema onde os alunos são sujeitos que agem na produção do conhecimento a ser alcançado. Ainda nesta fase o professor deve possibilitar aos alunos a formalização de conceitos e equações matemáticas que possam estar relacionadas ao tema, fazendo com que o conhecimento prévio que possuíam do tema possa ser compreendido frente ao conhecimento científico, evitando que os estudantes apenas decorem um novo conhecimento e continuem com o anterior sem uma compreensão da linguagem da ciência. No terceiro momento, a *Aplicação do Conhecimento*, o professor busca relacionar o tema trabalhado com o mundo no qual vivemos, a fim de mostrar para os alunos que aquele tema que inicialmente apenas era observado como algo real, é na verdade algo que é vivido, que faz parte de cotidiano e que conhecer este tema os ajudará a se tornarem cidadãos mais ativos em sua sociedade. Cabe aos estudantes utilizarem este conhecimento de forma a compreender e interferir em seu meio sociocultural, ou ainda, como afirmou Muenchen (2010, p. 153), “pretende-se que ‘dinâmica e evolutivamente’ o aluno perceba que o conhecimento, além de ser uma construção

historicamente determinada, está acessível para qualquer cidadão e por isso deve ser apreendido, para que possa fazer uso dele”. A aplicação aqui proposta não precisa estar diretamente relacionada à problematização inicial, mas pode ser compreendida a partir desta.

Os conceitos unificadores são trazidos como uma forma de complementar a discussão dos temas, trazendo temas contemporâneos para a sala de aula, pois

Os Conceitos Unificadores são complementares aos Temas e carregam para o processo de ensino-aprendizagem a veia epistêmica, na medida em que identificam os aspectos mais partilhados (em cada época) pelas comunidades de C&T (Ciência & Tecnologia), sem negligenciar os aspectos conflitivos. (ANGOTTI, 1993, p. 193)

Na medida em que os temas foram debatidos na sala de aula trouxemos os conceitos embasados na abordagem CTSA – Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente – que tende a mostrar para os alunos as inter-relações entre o conteúdo científico estudado, a tecnologia desenvolvida para e pelas outras vertentes, a sociedade na qual estamos inseridos e interfere diretamente nas demais, bem como é influenciada por elas e o ambiente com as consequências e utilidades no desenvolvimento da ciência, da tecnologia e da sociedade. Estes quatro setores são indissociáveis e é deste modo que veremos como esta abordagem está associada aos temas trabalhados.

Os TMP sofreram mudanças em sua estruturação desde que foram propostas inicialmente até os dias de hoje e estas reformulações acompanharam as mudanças que ocorreram na prática pedagógica, deixando esta estratégia sempre com um caráter atual e possível de ser aplicado em diversos meios. Como afirma Muenchen (2010, p. 156),

Ao longo dos anos, os 3MP foram sendo revistos e extrapolaram sua utilização inicial, tornando-se um parâmetro para o processo como um todo, fundamentalmente pelo aspecto dinâmico. [...] percebe-se que a participação do estudante e o seu cotidiano assumem um papel de destaque na prática educativa que utiliza os três momentos pedagógicos, proporcionando à educação um avanço no que se refere ao ensino tradicional.

O dinamismo citado acima se deve ao papel desempenhado por cada ator no processo de ensino-aprendizagem. Segundo Sauerwein e Terrazzan (2005), num relato de trabalho utilizando os Três Momentos Pedagógicos (TMP) propostos por Delizoicov e Angotti (1990, p. 55) – Problematização do tema, Organização do conhecimento e Aplicação do conhecimento –, após a seleção do tema a ser trabalhado

Foi possível escolher/elaborar as codificações das situações significativas para serem problematizadas junto aos alunos. Desta forma, o professor apreende as concepções dos alunos sobre as situações significativas. Neste momento, a fala do aluno prevalece sobre a do professor, isto é, este assume um papel de coordenador do debate, questionando as visões dos alunos. Em um momento posterior, foram planejadas as atividades que seriam desenvolvidas junto aos alunos. Aqui o professor assume o papel de “organizador” do conhecimento científico em função da estrutura de pensamento de seus alunos e da estrutura conceitual da área. E, finalmente, a partir dos dois momentos anteriores ocorre a reconstrução conjunta (professor e alunos) dos significados dos objetos do conhecimento.

O destaque dado à participação do estudante, bem como ao seu cotidiano, trazem o pensamento freireano à estruturação desta proposta e proporciona uma mudança em relação ao ensino tradicional, centrado no professor e na lousa. Para a utilização dos TMP é necessário a participação ativa dos estudantes nos momentos de discussão a fim de que todos possam perceber a relação entre suas próprias vidas e o conhecimento científico. A conscientização crítica sobre sua realidade só poderá ser alcançada a partir dos diálogos entre professor-aluno e aluno-aluno, durante os quais os alunos procurarão respostas às problematizações feitas pelo professor e estruturar o conhecimento discutido com sua realidade.

Os Três Momentos Pedagógicos não são caracterizados como uma ferramenta para avaliação do aluno, afinal, segundo Maunche (2010, p. 128), esta não é sua proposta:

A aplicação do conhecimento, ou seja, o terceiro momento pedagógico, não deve ser confundido com a avaliação. Quando se pensa a avaliação como processo, esta não deve se restringir ao terceiro momento pedagógico e vice-versa. A avaliação processual, não classificatória, deve ser pensada e abordada em todos os momentos [...]

A avaliação de acordo com essa abordagem por temas deve estar baseada na capacidade do aluno usar o conceito para compreender tanto as situações iniciais que determinaram seu estudo quanto as situações novas que possam ser compreendidas pelo mesmo conhecimento.

Desta forma, mesmo o aluno que visa apenas à obtenção de notas para sua aprovação, é levado a participar ativamente da aula e pode perceber ao longo do processo que sua curiosidade sobre o tema pode ser despertada. Assim, o conhecimento alcançado através dos diálogos e relações com sua realidade pode se tornar mais significativo quando comparado àquele obtido em práticas tradicionais de ensino.

### CAPÍTULO 3

#### METODOLOGIA DA PROPOSTA

Ensinar dialógica e problematizadamente, segundo a concepção freireana, implica investigar e agir simultaneamente com os envolvidos no processo educativo. Para tal, a pesquisa desenvolvida teve cunho qualitativo, pois esta tende a destacar os valores sociais do conhecimento produzido, se comunicando diretamente com a proposta freireana.

(...) a pesquisa, como ato de conhecimento, tem como sujeitos cognoscentes, de um lado, os pesquisadores profissionais; de outro, os grupos populares e, como objeto a ser desvelado, a realidade concreta. Quanto mais, em tal forma de conceber e praticar a pesquisa, os grupos populares vão aprofundando como sujeitos, o ato de conhecimento de si em suas relações com a sua realidade, tanto mais vão podendo superar ou vão superando o conhecimento anterior em seus aspectos mais ingênuos. Deste modo, fazendo pesquisa, educo e estou me educando com os grupos populares. Voltando à área para pôr em prática os resultados da pesquisa não estou somente educando ou sendo educado: estou pesquisando outra vez. No sentido aqui descrito pesquisar e educar se identifica em um permanente e dinâmico movimento (FREIRE, 1983, p.36)

A iniciativa desse tipo de pesquisa não é de testar hipóteses, e sim de desenvolvê-las. Já no momento inicial o diálogo é estabelecido entre os seres da pesquisa e os conceitos (ou nomes) sugeridos pelos alunos serão anotados para se fazer uma análise posteriormente.

A realidade é socialmente construída a partir da participação do pesquisador junto ao ambiente estudado, “anotando cuidadosamente tudo o que acontece nesse ambiente, registrando eventos – talvez através de audiotapes ou de videotapes –, coletando documentos tais como trabalhos de alunos...” (MOREIRA, 2011b, p.50). As opiniões e crenças dos sujeitos participantes são os dados a serem coletados através de entrevistas e dos próprios diálogos traçados durante os encontros. Cabe ao pesquisador anotar estas informações que são extremamente úteis para dar mais credibilidade à sua pesquisa.

A análise dos dados é feita pelo pesquisador que irá chegar a alguma conclusão e relatá-la em uma narrativa, a qual pode conter os relatos transcritos, as entrevistas feitas, as anotações provenientes dos momentos de diálogo com o grupo, a fim de enriquecer o texto tornando-o mais válido e permitindo que o leitor possa concordar ou não com as interpretações dadas pelo pesquisador.

No primeiro encontro do professor com a turma de alunos, mesmo não tendo sido feita uma investigação temática para propor um *tema gerador*, foi proposto um tema: a Bomba

Atômica, o qual estava de acordo com o conteúdo de Física que seria estudado. A sequência didática foi aplicada no decorrer das aulas que sucederam o diálogo inicial e a partir deste. Os conteúdos de Física relacionados ao tema foram trabalhados à medida que os conceitos (ou nomes) ditos inicialmente pelos alunos foram sendo revistos e contextualizados segundo as abordagens aqui propostas e numa perspectiva dialógica, pois os alunos sempre podem contribuir com os conhecimentos que já possuem e o professor nunca é um ser que tudo sabe. À medida que se desenvolveram as aulas, o professor teve que buscar sempre promover a curiosidade do aluno, pois somente desta forma o conhecimento pode ser alcançado.

Foi sugerida a divisão da turma em grupos com 04 ou 05 componentes para que fosse feita, inicialmente, uma discussão entre si e, depois, entre todos os grupos da sala sobre as indagações do professor sobre cada tema das aulas – problematização –, como sugerido por Delizoicov (1983, p. 95) em uma aplicação da concepção freireana no âmbito da educação formal:

*Durante a “aula”, empregando a dinâmica da problematização, o professor “desafia” os alunos-participantes com questões para que relatos e opiniões surjam. De modo geral discussões preliminares são realizadas por grupos de 4 alunos; posteriormente as posições de cada grupo são discutidas com toda a classe.*

Essa prática pode ser mais viável com turmas mais numerosas, pois através dela possibilita-se que todos os alunos possam contribuir com suas opiniões ao mesmo tempo em que já tem início a dialogicidade. Os TMP estavam presentes em cada encontro, nos quais foi trabalhada a temática pré-estabelecida vinculada aos temas falados pelos alunos no primeiro encontro.

O aluno foi avaliado durante todo o processo de trabalho à medida que buscava se alcançar uma criticidade transformadora através das discussões realizadas em sala e no momento final no qual foi feita uma discussão mais completa do conteúdo trabalhado ao longo das aulas, dado que

Na perspectiva dialético-libertadora a avaliação não tem um fim em si mesma, pois problematizando as realidades instaura-se um processo de substantividade democrática. Nela o aluno é visto como sujeito histórico na construção e reconstrução do conhecimento. As relações estabelecidas entre os sujeitos envolvidos diretamente no processo de ensino-aprendizagem (professor-aluno) têm como princípio político o diálogo. O professor é visto como um articulador dos novos conhecimentos a serem socializados, com os

conhecimentos prévios dos educandos; os conteúdos trabalhados são aqueles socialmente úteis. (LIMA e COSTA, 2008, p. 9-10)

## CAPÍTULO 4 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

### COMO UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PODE SER ELABORADA PARA ENSINAR FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR UTILIZANDO O EPISÓDIO DA BOMBA ATÔMICA, COMO TEMA GERADOR, ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E SOCIOCULTURAL?

A Sequência Didática (SD) proposta a seguir foi aplicada em uma escola da rede pública estadual de ensino da cidade de Feira de Santana, em que o regime de aulas por semana possui um total de 02 aulas de Física por semana. Sendo assim, essa proposta foi trabalhada ao longo de 05 semanas, totalizando 10 aulas, numa turma de 3º ano do ensino médio.

#### **Cronograma das aulas**

- **1º Encontro: 01 aula**

No começo da aula os alunos irão ouvir a música “Rosa de Hiroshima” composta por Gerson Conrad e Vinicius de Moraes e descrever o que entendem a partir dela sobre o que é essa “rosa de Hiroshima”. A proposta é iniciar a problematização do tema que será trabalhado (bomba atômica).

Após todos emitirem sua opinião, o professor irá introduzir uma problematização sobre o tema “bomba atômica”, tratando inicialmente de radiações. As perguntas serão feitas uma a uma e o professor estará registrando as respostas dadas para elas:

1. *Por que é perigoso ficar exposto ao Sol durante muito tempo, principalmente das 10 h às 16 h e sem passar bloqueador solar?*
2. *O que ocorre durante um exame de raios-X que nos permite ver a estrutura de nossos ossos?*
3. *O que é a bomba atômica e onde já ouviram falar dela?*
4. *A ciência e a tecnologia empregadas na bomba atômica podem estar relacionadas a algo benéfico?*
5. *Existe alguma relação entre a luz do Sol, os raios-X e uma bomba atômica?*
6. *Como os prótons que se encontram no núcleo de um átomo se mantêm próximos uns dos outros, visto que eles se repelem pela força elétrica?*

As respostas dadas irão servir de base para iniciar a discussão. O tema em questão pode ser relacionado com notícias vistas em meios de comunicação, não necessariamente uma experiência vivida pelo estudante. O objetivo é guiar a conversa para que a maior quantidade de alunos possa falar sobre suas impressões do assunto, saber das implicações que o conteúdo possa trazer para eles no que se refere ao uso da energia nuclear e aplicações desta nos contextos histórico, militar, político, científico, social, tecnológico, cultural e ético. Nesse momento o professor tem papel de mediador da conversa para que se mantenha o tema e estará analisando os saberes dos educandos através da exposição oral feita por estes. A dialogicidade aqui está ancorada no tripé educador – educando – objeto do conhecimento e busca a construção do conteúdo programático a partir do relato dos estudantes.

Sabendo que alguns termos, ou relações que se deseja trabalhar no tema, podem não aparecer durante as falas dos educandos, o educador pode usar imagens – projetadas em um slide ou outro recurso visual – para guiá-los a alguma forma de aplicação da energia nuclear que não tenha sido exposta. Como exemplo pode apresentar imagens de uma explosão nuclear – algo que provavelmente será dito no início do diálogo com os alunos – ou de uma usina nuclear ou uma pessoa fazendo uso de algum equipamento médico de radioterapia, indagando aos alunos o que representa cada imagem e qual a relação que podem fazer com o tema “bomba atômica”.

O uso de imagens ou relatos é tratado por Freire como uma “codificação” e este “código” deve representar a situação desejada. Esta atitude pretende proporcionar uma discussão sobre aplicações ou usos da energia nuclear nas seguintes áreas: bomba atômica, indústria, impactos ambientais e medicina. Como atividade para a próxima aula, há a leitura do texto “Mergulhando no núcleo atômico”, que é a aula 48 de Física do material do TELECURSO 2000 (ANEXO B do Produto Educacional).

- **2º Encontro: 02 aulas**

Formando grupos na sala – com 04 ou 05 componentes – o professor irá utilizar-se das falas anteriores dos alunos para organizar o conhecimento e aplicá-lo (segundo e terceiro momentos dos TMP).

Neste encontro a temática a ser trabalhada será a “bomba atômica” (ver CAPÍTULO 3 do Produto Educacional) e as perguntas feitas na aula anterior serão respondidas ao longo dos encontros. Podem ser lançadas novas problematizações para que os alunos discutam em seus próprios grupos antes de discutir com a sala, tais como:

1. *Quais os motivos que levaram à construção deste artefato?*
2. *Quais as consequências de seu uso?*
3. *Em que momento histórico ela foi desenvolvida?*
4. *Quais os países que a construíram?*
5. *Como a comunidade científica se posicionava diante da construção deste armamento?*
6. *Que tipo de fenômeno permite a grande liberação de energia quando uma bomba nuclear explode?*
7. *O que é uma reação em cadeia? O que provoca esta reação?*

O professor irá continuar registrando as discussões através de gravação do áudio ou vídeo, com permissão prévia dos estudantes. Também deve participar das discussões, mediando e mantendo a discussão dentro da temática trabalhada, trazendo informações quanto aos interesses políticos e militares das nações que investiam na produção deste armamento e o cenário científico – mais precisamente do desenvolvimento da Física – que proporcionou a criação de tal artefato bélico. Nesta aula, utilizando a HFC, o professor deve tratar do embate existente na comunidade científica entre os que eram a favor do desenvolvimento da bomba e os que eram contra (ver CAPÍTULO 3 do Produto Educacional), bem como explicar como se dá o processo de Fissão Nuclear (ver CAPÍTULO 2 do Produto Educacional).

A partir da leitura do material sugerido na aula anterior e das discussões na sala, o aluno produzirá um texto sobre o que aprendeu do tema para entregar ao professor. Esta atividade será analisada pelo professor e discutida com cada aluno, devolvendo-a para reformulação, se necessário, antes de atingir seu formato final.

- **3º Encontro: 02 aulas**

Nestas aulas será trabalhada a temática sobre a indústria, ou mais diretamente, as usinas nucleares (ver CAPÍTULO 4 do Produto Educacional). O objetivo é discutir o uso da energia nuclear na indústria. Para tal, os alunos serão novamente organizados em grupos para uma primeira discussão e posterior socialização das suas impressões. A problematização se dará em torno de:

1. *Como uma usina nuclear gera energia elétrica?*
2. *O processo que ocorre em seu interior tem algo em comum com o processo de construção da bomba atômica?*
3. *Uma usina nuclear pode explodir tal qual ocorre com a bomba nuclear?*

4. *O que é massa crítica?*
5. *Quais as consequências de um vazamento em uma usina nuclear?*

Após as discussões promovidas pela problematização, o momento de organização do conhecimento trará as definições sobre materiais radioativos e massa crítica, bem como de formas de energia e suas transformações. Caso o professor deseje abordar outros conteúdos da Física Moderna e Contemporânea, pode tratar do poço de potencial, contudo não foi objetivado este tema nesta aplicação. No terceiro momento pedagógico, as perguntas elaboradas serão retomadas e, tratando das questões sociais, o professor deverá discutir sobre o quadro energético existente no mundo e no Brasil, atualizando a discussão com a crise energética que o nosso país sofre devido à alta dependência das chuvas para encher os reservatórios das hidrelétricas. Será a energia nuclear uma alternativa para a crise energética? O Brasil investe em energia nuclear? Temos usinas aqui em nosso país?

Com relação às questões políticas e militares serão feitas perguntas que gerarão uma pesquisa para ser entregue na próxima aula:

1. *Por que o Brasil não pode produzir bombas atômicas?*
2. *Qual o acordo que foi feito, e com que país, impede tal uso do urânio?*

- **4º Encontro: 02 aulas**

Este encontro se iniciará com a entrega e discussão das pesquisas sobre o acordo do Brasil com a Argentina de não produção de armamentos nucleares para que todos os estudantes tenham consciência política deste acordo. Essa pesquisa tem como objetivo organizar o conhecimento que será discutido neste encontro.

Em seguida, como já passamos por discussões sobre a bomba atômica e sobre as usinas nucleares, vamos tratar dos impactos ambientais causados pela energia nuclear (ver CAPÍTULO 5 do Produto Educacional). Dentro do enfoque CTSA, a questão ambiental será discutida em relação às agressões causadas na natureza pelo uso tanto da bomba atômica quanto do risco de um vazamento em uma usina nuclear, já tratado na aula anterior.

Para problematizar o conteúdo os alunos serão indagados, em seus grupos, sobre:

1. *Há alguma notícia recente sobre derramamento de material radioativo na natureza?*
2. *O que acontece com o material radioativo quando há um acidente nuclear?*
3. *Quais as consequências para a fauna e flora da região atingida?*
4. *O que ocorre com o ser humano atingido pela radiação, seja de uma explosão de bomba nuclear ou de um vazamento de uma usina nuclear?*

5. *Qual é a diferença entre a radiação nuclear e outras radiações, como a ultravioleta, por exemplo?*

Durante a organização do conhecimento o professor utilizará o conhecimento do aluno durante a discussão em sala para formalizar e/ou informar sobre o conteúdo, tratando novamente de materiais radioativos, com ênfase em decaimento radioativo e interação da radiação com a matéria – aqui é sugerido para professores que venham a utilizar este material a possibilidade da inserção de outros conceitos de Física Moderna e Contemporânea, como o Efeito Fotoelétrico e o Efeito Compton, os quais não foram objetivos desta proposta.

Para aplicar o conhecimento serão discutidos os acidentes nucleares ocorridos em Fukushima, no Japão, em 2011, em Chernobyl, na Ucrânia, em 1986 e os impactos causados no Japão devido às bombas nucleares que finalizaram a II Guerra Mundial. Na realidade de nosso país será pedido para a aula seguinte uma pesquisa que terá como base o questionamento “Será que no Brasil já houve um acidente ou tragédia envolvendo radioatividade, com grande repercussão?” O professor deve evidenciar que não foi uma usina nuclear e que o material radioativo foi o Césio.

Leituras recomendada para aprofundar o conteúdo:

- [www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/04/140401\\_fukushima\\_retorno\\_moradores\\_fn](http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/04/140401_fukushima_retorno_moradores_fn)
- [http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo\\_de\\_fatos\\_sobre\\_a\\_radiacao\\_em\\_fukushima.html](http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo_de_fatos_sobre_a_radiacao_em_fukushima.html)
- <http://www.brasil.discovery.uol.com.br/enigma/imagens/chernobyl-26-anos-depois/>
- <http://ghostbusters79.blogspot.com.br/2014/06/25-fatos-assustadores-que-voce-deveria.html>
- <http://atomicbombmuseum.org/>

• **5º Encontro: 02 aulas**

Discussão sobre pesquisa que trata do acidente com o Césio-137 em Goiânia, Goiás, em 1987. Essa discussão deve despertar no aluno o senso crítico para o uso de materiais radioativos, gerando o tema deste encontro: a energia nuclear na medicina (ver CAPÍTULO 6 do Produto Educacional). Trata-se, portanto de uma atividade metodológica presente no segundo momento pedagógico, para organizar o conhecimento.

Novamente com a sala dividida em grupos o professor deve começar a indagar seus alunos sobre:

1. *O que é física médica e qual a área de atuação dos profissionais com esta formação?*
2. *Quais os aparelhos médicos que vocês conhecem que utilizam radiação?*
3. *Vocês sabem que até para fazer um exame de raios-X é necessário tomar algumas precauções? Quais?*
4. *Por que é necessário entrar em um aparelho para fazer uma ressonância magnética?*

Durante essa discussão vamos tratar de aspectos tecnológicos e sociais da ciência, devido ao avanço proporcionado pela física no diagnóstico por imagens ou mesmo no tratamento de algumas doenças. Na organização do conhecimento serão tratados os conceitos e leis que regem o uso da radiação no diagnóstico por imagem e durante a aplicação do conhecimento serão respondidas as questões propostas e tratado o lado social, mencionado acima. Se o professor que estiver aplicando a sequência desejar trabalhar os tópicos de Efeito Fotoelétrico e Efeito Compton, poderá novamente tratá-los aqui, juntamente com a discussão da geração de raios X, visto que a interação da radiação com a matéria pode produzir diferentes efeitos, inclusive estes aqui citados.

Após o momento de organização do conhecimento, será passado para os alunos o vídeo “ACIDENTE NUCLEAR EM GOIÁS- RECORD” que possui 11:02 minutos de duração e foi feito pela emissora de televisão Record durante o episódio do vazamento de radiação em Fukushima e traz o assunto para a realidade do Brasil, tratando da falta de conhecimento científico por parte dos cidadãos de Goiás em 1987 e as consequências do uso inadequado do material radioativo, e mostra a realidade das usinas nucleares em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. Como o vídeo é curto – visando a não dispersão da turma caso o vídeo fosse mais longo – será mostrado também o vídeo de 08:43 minutos exibido pelo programa da emissora de televisão Globo “FANTÁSTICO - HISTÓRIA DA BOMBA ATÔMICA”, exibido no contexto em que completavam 60 anos da explosão das bombas no final da II Guerra. Este vídeo retoma o assunto da bomba atômica e trata mais uma vez de como ocorre a fissão nuclear e quais eram alguns dos cientistas envolvidos no processo de produção do armamento nuclear.

Como sugestão de atividade a ser aplicada por outros professores que consultem este material, mas que não foi feito nesta sequência por motivos temporais, fica a ideia de montar um júri simulado que poderá ser estruturado e finalizado em 04 aulas. O professor retomará o tema gerador de toda discussão – a bomba atômica – e os alunos serão divididos em três grupos com a proposta de se fazer um grande debate na sala – um júri simulado – onde o conhecimento trabalhado até aqui será discutido como no cenário científico da produção e

utilização desta arma nuclear ao fim da II Grande Guerra. Um grupo representará os cientistas que eram favoráveis à construção e utilização da bomba, outro grupo representará os cientistas contra e um terceiro grupo representará os jurados.

No próximo encontro, que poderá durar 01 aula, os alunos já deverão estar cientes de quem são estes cientistas os quais representarão no júri, portanto podem fazer uma pesquisa com o seguinte direcionamento: quais cientistas eram a favor da utilização da bomba atômica e quais eram contra? Apesar desta discussão ter sido trazida quando tratamos de HFC na aula sobre a bomba atômica, uma pesquisa feita pelos alunos trará mais informações para que eles possam desenvolver melhor este trabalho.

Nesta primeira aula com este propósito cada cientista envolvido no debate será atribuído a um aluno, o qual receberá um material para estudo que lhe dará condições de defender o ideal de seu personagem (ver CAPÍTULO 3 do Produto Educacional). Os alunos irão estudar os argumentos destes cientistas para poder utilizá-los a fim de convencer um júri sobre lançar ou não lançar as bombas “Little boy” e “Fat man” sobre o Japão.

O professor irá coordenar cada grupo de cientistas a representar apenas aquele interesse demonstrado na época da II Guerra Mundial, lembrando que não devem ser influenciados por suas vontades pessoais. O grupo de jurados irá se responsabilizar pela organização do espaço. Será interessante que cada participante possa se caracterizar da personagem que representará, tentando tornar o trabalho o mais próximo do contexto no qual ocorreu.

Neste encontro sugiro que seja passado um documentário sobre o acidente da usina em Chernobyl com objetivo de mostrar os impactos causados pela radiação espalhada pelo vazamento do reator nuclear.

No próximo encontro – que também irá durar 01 aula – o professor poderá coordenar um ensaio individual para os grupos, de modo que um não conheça os argumentos do outro. O professor deverá observar cada personagem a fim de ajudá-lo em sua defesa.

Para a realização do júri, sugiro a utilização de 02 aulas a fim de promover uma maior discussão que poderá ser utilizada como uma das formas de avaliação dos alunos. A dinâmica de discussões onde cada cientista representado por um aluno apresenta sua ideia será guiada pelo professor, a fim de se manter o direito de todos falarem seus motivos ao júri. Para este encontro o ideal é que seja feita uma filmagem – mesmo que os demais encontros tenham gravado apenas o áudio – da qual o professor poderá fazer uso para analisar calmamente se os alunos realmente estavam utilizando toda a discussão feita até aqui em seus aspectos científicos, sociais, históricos, éticos e políticos durante a encenação.

O júri irá julgar se a bomba deve ou não ser lançada sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki e dar sua explicação sobre sua decisão, também utilizando o conhecimento estudado e as falas apresentadas pelos colegas-cientistas.

Independente da decisão tomada, o professor utilizará um aplicativo – NUKEMAP – que mostra a explosão e os danos causados por bombas nucleares e que permite selecionar a cidade e o tipo de bomba usada (<http://nuclearsecrecy.com/nukemap3d/>). Com este aplicativo o professor poderá mostrar se a decisão tomada pelo júri salvou ou destruiu as vidas de milhares de pessoas, bem como a área afetada pela radiação, tratando de uma discussão mais ética e social.

- **6º Encontro: 01 aula**

Momento final da aplicação da Sequência Didática na qual os alunos irão dar suas opiniões sobre o que compreenderam do conteúdo em um relato escrito, de modo rápido e simples, visando à descrição do conteúdo em sua vida e como utilizá-lo nela.

Após a entrega e leitura deste texto o professor dará os resultados obtidos pelos alunos a partir dos diferentes critérios utilizados para avaliação.

## **AVALIAÇÃO**

Os instrumentos usados para avaliação dos estudantes serão:

- Participação nas discussões;
- Elaboração do texto sobre a leitura recomendada;
- Realização das pesquisas.

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Pretendia-se que esta sequência didática pudesse ensinar aos alunos alguns conhecimentos sobre radioatividade associados à Física Moderna e Contemporânea, explorando o processo de Fissão Nuclear e o que é Energia Nuclear, com seu uso benéfico e maléfico. A curiosidade que se pretendia gerar em cada encontro quando se tratava uma temática deveria guiá-lo ao estímulo em aprender, em participar das discussões para despertar sua consciência crítica e poder tomar decisões em sua vida com base no conhecimento

adquirido. O enfoque CTSA deveria lhe mostrar, juntamente com a HFC, como se dá numa abordagem contextual o ensino de ciências, especificamente de Física.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Sequência Didática (SD) foi aplicada ao longo de 11 aulas (50 minutos cada uma) no período da IV unidade do ano letivo de 2015, com uma turma de 20 alunos da 3ª série do Ensino Médio do Colégio Estadual Governador Luiz Viana Filho, na cidade de Feira de Santana-Bahia.

O primeiro contato dos alunos com a proposta ocorreu antes do início da aplicação, quando os alunos recebiam provas e notas da III Unidade e foram esclarecidos sobre como ocorreriam as aulas da IV unidade e foram apresentados ao Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) que se encontra no ANEXO A do Produto Educacional. Na ocasião cada aluno recebeu duas vias do TCLE para leitura em casa e assinatura concordando com a aplicação da SD e gravação dos encontros, sendo devolvida uma das vias ao professor.

No primeiro momento de aplicação da SD foi passada a música “ROSA DE HIROSHIMA” e os alunos lembraram-se da avaliação da disciplina História, na qual viram a letra da música e logo associaram à bomba atômica. Indagados sobre o que sabiam a respeito dela falaram sobre os Estados Unidos da América ter lançado duas bombas no Japão porque este havia atacado alguma base militar dos EUA e por vingança fizeram isso.

Com a primeira problematização surgiu uma notícia preocupante e que nos estimulou ainda mais em aplicar esta SD com este grupo: os alunos disseram que não têm costume de assistir telejornais ou ler informações em revistas e jornais. Vimos uma situação que lembrou a falta de informação sobre a radiação em Goiás, quando houve o acidente com o Césio, em 1987. Este relato dos alunos surgiu na terceira pergunta, relacionada às bombas atômicas, quando estendi a discussão para a atualidade, devido às recentes notícias que apareceram nos meios de comunicação tratando dos 70 anos que se passaram desde a explosão das bombas que finalizaram a Segunda Guerra Mundial. As perguntas feitas neste encontro geraram respostas semelhantes entre os alunos, as quais foram registradas e aqui colocadas:

- 1. Por que é perigoso ficar exposto ao Sol durante muito tempo, principalmente das 10 h às 16 h e sem passar bloqueador solar?*

RESPOSTA:

“O Sol pode causar câncer de pele devido à radiação solar.”

2. *O que ocorre durante um exame de raios-X que nos permite ver a estrutura de nossos ossos?*

RESPOSTA: Os alunos não sabiam por que ou como o raio X funciona.

3. *O que é a bomba atômica e onde já ouviram falar dela?*

RESPOSTAS:

ALUNO 1	<i>“Ouvi na música que passou agora.”</i>
ALUNO 2	<i>“Na Segunda Guerra, com o Japão em guerra com os EUA, na qual o Japão tinha armas normais e os EUA tinha bomba atômica para destruição em massa.”</i>

Neste momento informamos aos alunos sobre notícias vinculadas aos 70 anos do uso da bomba atômica, as quais foram vinculadas em vários meios de comunicação um mês antes do início desta aplicação e nos dão mais um motivo para fazer uso desta temática em nossas aulas.

4. *A ciência e a tecnologia empregadas na bomba atômica podem estar relacionadas a algo benéfico?*

RESPOSTAS:

ALUNO 3	<i>“Como forma de energia”</i>
ALUNO 4	<i>“Energia Nuclear em uma usina nuclear”</i>
ALUNO 5	<i>“Os raios-X”</i>

5. *Existe alguma relação entre a luz do Sol, os raios-X e uma bomba atômica?*

RESPOSTAS:

ALUNOS 2, 3 E 6	<i>“Radiação gama”</i>
-----------------	------------------------

Com esta resposta, que surgiu de uma brincadeira entre três garotos que falavam de super-heróis, foi esclarecido que não é saudável se expor à radiação e que ela trouxe problemas de saúde às vítimas das bombas nucleares.

6. *Como os prótons que se encontram no núcleo de um átomo se mantêm próximos uns dos outros, visto que eles se repelem pela força elétrica?*

Esta pergunta foi inserida após a aplicação da SD visando gerar uma curiosidade por parte dos alunos em compreender a estabilidade nuclear e discutir a força nuclear forte.

Após estas perguntas, e seguindo a ideia freireana de usar imagens para uma “codificação” que traz consigo a discussão dos temas que foram abordados ao longo das próximas aulas, mostrei uma sequência de imagens (ANEXO C do Produto Educacional) aos alunos e em cada uma foi perguntado sobre o que representa a imagem e se há relação com o tema “bomba atômica”. A maioria das respostas foi positiva na identificação das imagens e fui trazendo, a partir das falas dos alunos, as características em comum entre a imagem e as perguntas já feitas ou nosso tema gerador de toda a discussão – momento de Organização e de Aplicação do conhecimento. Somente o aparelho de ressonância magnética foi confundido com um tomógrafo e foi discutido sobre quais outros aparelhos de diagnóstico por imagem conheciam até chegarmos ao de ressonância, e utilizei a imagem de uma ressonância do cérebro humano para mostrar a diferença com a imagem da radiografia.

O texto do TELECURSO 2000 (ANEXO B do Produto Educacional) sugerido ao final deste encontro foi trabalhado na nossa aplicação após o 2º encontro, mas percebemos que seria mais benéfico trazê-lo para este momento para enriquecer as discussões que se darão nos próximos encontros, dando possibilidade de o aluno ser mais participativo.

O segundo encontro durou uma aula além da prevista – daí a diferença das 10 aulas planejadas para as 11 executadas –, pois foi necessário detalhar melhor o processo da fissão nuclear, após fazer a contextualização histórica de sua descoberta e tratar de sua relação com a bomba atômica. A sala se dividiu em 04 equipes e, como resultado para as perguntas feitas – momento de problematização do tema –, cada grupo gerou uma resposta que foi lida e discutida em sala de aula:

1. *Quais os motivos que levaram à construção deste artefato?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Rivalidade entre os EUA e o Japão e também alcançar a destruição em massa.”</i>
GRUPO 2	<i>“Construir armamentos mais fortes e potentes e desenvolver as primeiras armas nucleares.”</i>
GRUPO 3	<i>“Vingança pelo ataque aos EUA”</i>
GRUPO 4	<i>“Os EUA queriam mostrar que tinham mais força que o Japão”</i>

2. *Quais as consequências de seu uso?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Morte de milhares de pessoas e a doença de outros vários e seus descendentes.”</i>
GRUPO 2	<i>“Destruição de lugares e pessoas em grande quantidade e transmissão de radiação nuclear”</i>
GRUPO 3	<i>“A destruição causada, tanto pela explosão quanto pela radioatividade”</i>
GRUPO 4	<i>“Destruição e morte de milhares de pessoas”</i>

3. *Em que momento histórico ela foi desenvolvida?*

RESPOSTAS: *“Durante a Segunda Guerra Mundial”* – todos responderam o mesmo.

4. *Quais os países que a construíram?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“EUA e URSS”</i>
GRUPO 2	<i>“Os EUA com apoio do Reino Unido e Canadá”</i>
GRUPO 3	<i>“Os Estados Unidos”</i>
GRUPO 4	<i>“Os Estados Unidos”</i>

5. *Como a comunidade científica se posicionava diante da construção deste armamento?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Foi um grande marco para a comunidade científica, pois foi a primeira vez que foi registrado o uso de armas nucleares durante toda a história.”</i>
GRUPO 2	-
GRUPO 3	-
GRUPO 4	-

Esta última pergunta foi respondida apenas por um grupo, mostrando (provavelmente) a falta de percepção dos alunos da ligação entre a ciência, a tecnologia e a sociedade. Comecei neste momento a tratar dos cientistas que estavam envolvidos com a bomba atômica – organização do conhecimento –, iniciando com Albert Einstein por ser um dos cientistas mais famosos na história da ciência e contextualizando historicamente com o momento em que o nazismo e o fascismo afugentam vários cientistas da Alemanha e da Europa.

As duas perguntas que se seguem foram criadas após a aplicação desta sequência, como sugestão para fazer os alunos refletirem mais sobre a fissão nuclear, antes de tratarmos dela na aula, e, portanto, não possuem um relato de respostas:

6. *Que tipo de fenômeno permite a grande liberação de energia quando uma bomba nuclear explode?*
7. *O que é uma reação em cadeia? O que provoca esta reação?*

Na aula seguinte trouxemos de volta o contexto de criação da bomba atômica e o posicionamento de alguns cientistas antes e depois de sua criação. Em seguida, trabalhamos como se dá o processo de fissão nuclear (o professor deve transpor o conteúdo encontrado no CAPÍTULO 2 do Produto Educacional para tornar a linguagem mais acessível aos alunos de Ensino Médio), o qual foi formalizado e finalizado na aula seguinte – aplicação do conhecimento. Durante estas aulas tratamos da estabilidade nuclear, aproveitando o conhecimento dos alunos sobre a estrutura atômica, e da energia necessária para desintegrar um núcleo, utilizando a famosa equação de Einstein que relaciona massa e energia:  $E = mc^2$ . A partir daí, falamos sobre a transmutação nuclear e como algumas partículas podem se transformar em outras através do decaimento radioativo.

Como exemplo mais comum por ter sido utilizado na bomba atômica e ter feito parte da história da descoberta da fissão nuclear, trouxemos o Urânio para a discussão de como se dá a fissão nuclear e como ocorre a reação em cadeia responsável pela grande liberação de energia nuclear neste processo. Tentamos, então, mostrar aos alunos que é necessário uma energia mínima para se dar início ao processo de fissão – a energia de ativação.

Ao final da aula cada aluno recebeu um material (ANEXO B do Produto Educacional) para estudar em casa sobre a estrutura do núcleo, visando melhor compreensão do processo da fissão nuclear.

No terceiro encontro a turma se dividiu em 05 grupos, sendo que alguns alunos não fizeram os mesmos grupos da aula anterior, algo que vi de modo positivo, pois aumenta a diversificação das respostas dadas às perguntas:

1. *Como uma usina nuclear gera energia elétrica?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Através da fusão nuclear”</i>
GRUPO 2	<i>“Usinas nucleares são usinas térmicas que usam o calor produzido na</i>

	<i>fissão para movimentar vapor de água que movimenta as turbinas em que se produz a eletricidade”</i>
GRUPO 3	<i>“Por meio da utilização da energia nuclear”</i>
GRUPO 4	<i>“Através da energia nuclear, que pode ser transformada em outras formas de energia como a térmica e a elétrica úteis aos homens”</i>
GRUPO 5	<i>“Através do aquecimento e expansão do urânio”</i>

Após discutir sobre algumas respostas que continham ideias erradas, e a partir desta pergunta, fizemos uma contextualização com a matriz energética brasileira, diferenciando as hidrelétricas de termelétricas e de usinas nucleares, tratando da crise energética brasileira que enfrentamos devido à seca em alguns sistemas de armazenamento de água.

2. *O processo que ocorre em seu interior tem algo em comum com o processo de construção da bomba atômica?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Sim, pois é preciso que haja um aquecimento do urânio para gerar energia”</i>
GRUPO 2	<i>“O núcleo de certos elementos sofre uma divisão chamada de fissão nuclear, o mesmo processo ocorre na construção da bomba atômica”</i>
GRUPO 3	<i>“Sim, usa um elemento químico radioativo: o urânio”</i>
GRUPO 4	<i>“Sim, a energia nuclear produzida de forma controlada nas usinas nucleares também pode ser gerada sem controle por bombas nucleares”</i>
GRUPO 5	<i>“Sim, porque é preciso que haja um aquecimento do urânio para gerar energia tal como na construção da bomba atômica”</i>

Conversamos com os alunos que não há aquecimento do urânio, e sim da água que fica em contato com o reator devido ao processo de fissão nuclear liberar energia.

3. *Uma usina nuclear pode explodir tal qual ocorre com a bomba nuclear?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Não, porque a reação dentro de uma usina nuclear é controlada”</i>
GRUPO 2	<i>“Sim, pois são liberadas partículas que saem do núcleo radioativo com bastante energia cinética”</i>

GRUPO 3	<i>“Não, pois a reação dentro de uma usina é controlada já na bomba atômica não é controlada”</i>
GRUPO 4	<i>“Sim, por causa da radioatividade, e por causa dos elementos químicos”</i>
GRUPO 5	<i>“Sim, se não tiver o devido resfriamento”</i>

Para refletir sobre a ideia de se uma usina nuclear pode explodir como uma bomba foi trabalhado o conceito de massa crítica e os diversos mecanismos que controlam a reação em cadeia no interior do reator nuclear e chegamos à conclusão de que não há esse risco numa usina.

#### 4. O que é massa crítica?

Esta pergunta foi inserida após a aplicação da SD para que os alunos unam este conceito à pergunta anterior e entendam a diferença entre o material radioativo usado em usinas nucleares e em bombas atômicas. Portanto, não possui relato de respostas.

#### 5. Quais as consequências de um vazamento em uma usina nuclear?

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Contaminação da natureza (lagos, rios, plantas e animais) e problemas genéticos”</i>
GRUPO 2	<i>“Ao penetrar na matéria essas partículas transferem energia aos átomos e moléculas e se essa matéria for o corpo humano pode ocorrer lesões, essas lesões podem agredir a pele ou órgãos internos, a radiação é capaz de destruir as moléculas que compõem esses órgãos”</i>
GRUPO 3	<i>“Contaminação do solo, da água, prejudicando a saúde dos seres vivos”</i>
GRUPO 4	<i>“Doenças fatais e hereditárias”</i>
GRUPO 5	<i>“Mortes e doenças, mutações, anomalias e etc.”</i>

Na discussão desta pergunta foi trazido o acidente de Fukushima e o de Chernobyl, tratando da meia vida dos materiais radioativos. Na aula seguinte, visando o segundo momento dos TMP, retomei o conteúdo a partir da Segunda Guerra Mundial a fim de mostrar que após as explosões das bombas sobre o Japão algumas nações tentaram controlar o uso da energia nuclear através da criação de agências reguladoras e acordos mundiais para não proliferação de armas nucleares (TNP). Após os acidentes nucleares nos EUA em 1979 –

Three Mile Island – e na URSS em 1986 – em Chernobyl –, as duas grandes potências mundiais que travavam a Guerra Fria, o poder da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) aumentou dado que poderia controlar e mediar o uso da energia nuclear a fim de evitar desastres. Através de algumas imagens (ANEXO D do Produto Educacional) explicamos novamente como é a estrutura do reator da usina nuclear, especificando como é o processo de contenção da reação em cadeia e como é o sistema de resfriamento e outras imagens tratando da matriz energética brasileira para conscientizar os alunos sobre a realidade de nosso país e das causas de problemas vinculados à falta de energia elétrica.

Ao final da aula foi sugerida a pesquisa sobre o acordo entre o Brasil e a Argentina, o qual proíbe o enriquecimento de urânio com fins bélicos, para ampliar a discussão sobre a regulação do uso da energia nuclear e tratar de nosso país. Contudo o resultado das pesquisas foi insatisfatório, dado que somente dois alunos atingiram o objetivo de estudar sobre a realidade brasileira e os demais que fizeram esta atividade trataram apenas do TNP que já havia sido falado durante a aula.

No quarto encontro, após receber as pesquisas e falar do acordo entre o Brasil e a Argentina, fizemos a problematização sobre impactos ambientais causados pela energia nuclear e a turma se dividiu novamente em 05 equipes para discussão interna e posterior socialização das respostas que seguem:

1. *Há alguma notícia recente sobre derramamento de material radioativo na natureza?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Sim, em Fukushima. O complexo foi afetado criticamente em criticamente em 2011 após um terremoto e tsunami, que destruíram parte da costa do país Asiático”</i>
GRUPO 2	<i>“Sim, em Fukushima. O complexo foi afetado criticamente em criticamente em 2011 após um terremoto e tsunami, que destruíram parte da costa do país asiático”</i>
GRUPO 3	<i>“Sim, em Fukushima”</i>
GRUPO 4	<i>“Sim. Fukushima”</i>
GRUPO 5	<i>“Sim. Fukushima”</i>

2. *O que acontece com o material radioativo quando há um acidente nuclear?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Ocorre um efeito de um material radioativo e o meio ambiente”</i>
GRUPO 2	<i>“Ocorre como efeito de um material radioativo e o meio ambiente”</i>
GRUPO 3	<i>“Acontece uma fissão entre o material radioativo e o meio ambiente”</i>
GRUPO 4	<i>“Emite radiação no meio ambiente”</i>
GRUPO 5	<i>“Ele fica impregnado na natureza”</i>

Aproveitamos a pergunta para tratar novamente da meia vida de elementos radioativos.

### 3. Quais as consequências para a fauna e flora da região atingida?

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Acontece desequilíbrio ambiental”</i>
GRUPO 2	<i>“Um desequilíbrio ambiental”</i>
GRUPO 3	<i>“Desequilíbrio ambiental”</i>
GRUPO 4	<i>“Desequilíbrio ambiental, problemas ambientais em águas, vegetais, animais, plantas, solo etc.”</i>
GRUPO 5	<i>“São destruídas e com o tempo provavelmente são afetados outros animais”</i>

A partir das respostas foi trazido novamente o desastre em Fukushima e em Chernobyl para organizar o conhecimento e foi feito um paralelo com a radiação emitida pelas bombas atômicas explodidas após a Segunda Guerra caracterizando o fall out e a necessidade de não consumir alimentos das regiões atingidas, implicando diretamente na economia de algumas nações.

### 4. O que ocorre com o ser humano atingido pela radiação, seja de uma explosão de bomba nuclear ou de um vazamento de uma usina nuclear?

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Mudanças genéticas e doenças hereditárias”</i>
GRUPO 2	<i>“Mudanças genéticas e doenças hereditárias”</i>
GRUPO 3	<i>“Mutações genéticas e doenças hereditárias”</i>
GRUPO 4	<i>“O seu organismo é afetado ficando vulnerável a doenças”</i>
GRUPO 5	<i>“O nível de radiação pode levar a morte”</i>

Para que os alunos não achem que a radiação está associada apenas às bombas e usinas, lembramos que o Sol é uma fonte de radiação e que os alimentos que consumimos, como o leite e a carne, possuem baixos níveis de radiação e não são prejudiciais a nossa vida.

Para uma maior discussão sobre as diferenças entre a radiação nuclear e outras formas de energia que recebemos do Sol, ou durante a exposição a um aparelho de raio X, inserimos a próxima pergunta após a aplicação da SD. Desta forma, não temos aqui um relato de respostas dos alunos.

5. *Qual é a diferença entre a radiação nuclear e outras radiações, como a ultravioleta, por exemplo?*

Após uma explicação mais detalhada sobre o acidente de Chernobyl foi pedido que os alunos fizessem uma pesquisa sobre o acidente radioativo de Goiás em 1987, no qual várias pessoas se contaminaram com o Césio-137, a fim de despertar o senso crítico dos alunos e mostrar o conteúdo dentro da realidade brasileira.

No quinto encontro, mais uma vez os alunos se agruparam em 05 equipes e responderam às perguntas que tratam da Física Médica:

1. *O que é física médica e qual a área de atuação dos profissionais com esta formação?*

RESPOSTAS: Nenhum grupo soube responder esta pergunta.

2. *Quais os aparelhos médicos que vocês conhecem que utilizam radiação?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Ressonância magnética, tomografia e aparelho de radioterapia”</i>
GRUPO 2	<i>“Raios-X, ressonância magnética”</i>
GRUPO 3	<i>“Raios-X, tomografia, radioterapia”</i>
GRUPO 4	<i>“Raios-X, tomografia, radiografia, radiologia”</i>
GRUPO 5	<i>“Aparelho de fazer raios-X, aparelho de ressonância magnética”</i>

3. *Vocês sabem que até para fazer um exame de raios-X é necessário tomar algumas precauções? Quais?*

RESPOSTAS:

GRUPO 1	<i>“Não pode estar com metais, usar roupas leves”</i>
---------	---

GRUPO 2	<i>“A precaução em relação a quantidade de radiação que a pessoa irá ser submetida caso contrário a radiação pode ser prejudicial e causar doenças ao invés de prevenir”</i>
GRUPO 3	<i>“Sim. Não pode uso de platina, objetos de metais”</i>
GRUPO 4	<i>“Proteger os olhos, usar roupas leves, não usar nenhum tipo de jóia ou bijuterias, etc.”</i>
GRUPO 5	<i>“Sim, evitar o uso de objetos metálicos”</i>

#### *4. Por que é necessário entrar em um aparelho para fazer uma ressonância magnética?*

Esta pergunta foi inserida após a aplicação da SD para promover uma reflexão ou estimular a curiosidade nos alunos a fim de tratar do campo magnético criado pela máquina e a radiação de baixa frequência que é utilizada para interagir com os átomos de hidrogênio de nosso corpo. Como não foi sugerida anteriormente, não temos relato de respostas.

Após as respostas dos alunos, no momento de organização do conhecimento, as perguntas foram retomadas e explicadas de modo claro, mostrando para os alunos o que é a Física Médica, com o que os profissionais desta área trabalham; o que eles podem fazer para relacionar os conhecimentos da Física com a área médica e onde a Física é encontrada nos aparelhos de diagnóstico por imagem, mostrando a aplicação deste conhecimento tanto no funcionamento dos aparelhos quanto nos cuidados que devem ser tomados em exames que utilizam radiação e desmistificando a falsa impressão que alguns podem ter de que pessoas que fazem tratamentos ou exames que utilizam a radiação ficam radioativos e podem contaminar outras pessoas.

Trouxemos a história de como o raio-X foi descoberto por Röntgen e, devido a esta descoberta, como o Becquerel e o casal Curie chegaram à radioatividade numa tentativa de mostrar a ligação entre os conteúdos que estivemos trabalhando ao longo da unidade. Trazendo para a Física Médica, discutimos como as partículas alfa, beta, a radiação gama e os raios X ionizam a matéria com a qual interage. Diferenciamos o uso do Urânio em usinas e bombas nucleares do uso de radiofármacos, como o Iodo, usado na medicina nuclear.

Sobre os aparelhos de diagnóstico de imagem, diferenciamos em que situações se utilizam o aparelho de raios-X e em que situações se usam o aparelho de Ressonância Magnética Nuclear, explicando como a radiação de baixa frequência interage com o hidrogênio de nosso corpo e consegue produzir a imagem de uma determinada região.

Para finalizar este encontro foram passados dois vídeos para os alunos perceberem mais uma vez a realidade brasileira no cenário mundial relacionado à física nuclear e lembrarem-se de nosso tema gerador destas aulas: a bomba atômica. Primeiro os alunos assistiram um vídeo sobre o acidente radioativo em Goiás em 1987, o qual mostrava também cuidados com a segurança nas usinas nucleares em Angra dos Reis, no momento em que o mundo via com receio o acidente em Fukushima. Após uma breve discussão sobre o vídeo passamos o segundo vídeo que retrata um pouco da história de alguns cientistas envolvidos no processo de fabricação das primeiras bombas nucleares.

No sexto e último encontro os alunos foram solicitados a dar suas opiniões sobre o que compreenderam do conteúdo em um relato escrito, visando à descrição do conteúdo em sua vida e como utilizá-lo nela. Algumas respostas estão registradas abaixo da forma que foram dadas – sem correções ortográficas:

ALUNO 4:

O conteúdo desta unidade relatou o início do uso das bombas atômicas, os seus devidos fabricantes, os estragos que a bomba atômica causa.

Relatou também os inúmeros acidentes nucleares tanto no Brasil, quanto em outros países, citou as devidas precauções a serem tomadas em devidos acidentes atômicos e também com a radiação.

Falou também sobre as leis que surgiram, os grandes cientistas como Albert Einstein.

Também sobre a composição química das devidas bombas, mostrou que a radiação não é somente transmitida através de bombas, mais também em outros aparelhos com por exemplo o raio X.

ALUNO 7:

No decorrer dessa unidade aprendi sobre as Bombas Atômicas, os acontecimentos que ocorreram em Hiroshima e Nagasaki em 6 e 9 de agosto de 1945. Obtive conhecimento de como é a destruição causada por uma Bomba Atômica que quando se explode, uma grande quantidade de energia é liberada.

Aprendi também sobre a Física Médica que é uma área que se desenvolveu usando conteúdos das ciências físicas aplicados à saúde.

Em nosso dia-a-dia podemos encontrar a radioatividade nos aparelhos de combate ao Câncer e também está presente na luz solar.

ALUNO 8:

O conteúdo desta unidade, nos trouxe conhecimentos sobre tragédias nucleares que aconteceram tanto no Brasil como fora dele, como, quando e o porque essas armas foram criadas, descrevendo a formação e utilização de armas nucleares, o nível de estrago que elas podem causar, as consequências e sequelas aos expostos, tanto os seres vivos, como a agressão ao meio ambiente, o tempo para recuperação das áreas afetadas, os problemas de saúde causados por radiação, inclusive o sol.

ALUNO 9:

Foi visto nesta unidade, que a radiação, não faz só mal, mas, também faz bem e ajuda a nossa saúde. Desde tomar um solzinho nas primeiras horas da manhã, desde os alimentos que ingerimos no dia-a-dia.

Estudamos também sobre as usinas nucleares, que apesar de nos beneficiar e gerar energia elétrica para o nosso cotidiano, deve ter muito cuidado ao se trabalhar em uma usina nuclear. Por serem muito altas os riscos de explosão.

Também vimos e ouvimos matérias sobre as "bombardeiras atômicas", que destruíram as cidades de Hiroshima e Nagasaki. Vimos que em sua composição tinha grande quantidade de urânio e plutônio. Esses elementos químicos, são muito perigosos a nossa saúde.

Foi entendido também que, se nos submetemos a um exame de raios X, sem os devidos cuidados, podemos desenvolver vários problemas.

Por fim, tudo que foi dado e estudado, aprendi e o que já sabia melhorei um pouco. E tudo de um certo modo está relacionado com a nossa vida. 🌸🌻🌹🌺🌷🌸

ALUNO 10:

O conteúdo que estudei nesta unidade foram assuntos etímoes, está relacionada ao nosso dia a dia, como a radioatividade algumas máquinas que possuem radiação como a máquina de ressonância magnética, raio X e até mesmo o microondas que eu não sabia que possuía radiação, esses assuntos que aprendi com certeza irei utilizar quando tiver em uma universidade, faculdade mesbran e que eu aprendi vou corrigir por toda minha vida sem esquecer cada explicações, exemplos estudados. Não só o assunto da radiação, os outros assuntos estudados também como resinas nucleares, núcleo atômico, o acidente radiativo que aconteceu em Góias etc.

Analisando a aplicação da SD nesta turma percebemos que o conhecimento científico sobre algumas situações comuns de nosso cotidiano são desconhecidas por nossos estudantes. Constatamos que alcançamos um objetivo almejado de tratar da Física e da Energia Nuclear e fazê-los perceber que existe uma comunicação real entre o conhecimento visto em sala de aula e notícias ou tecnologias que nos rodeiam e que têm influência em nossas vidas.

Um dos problemas que acabamos enfrentando durante nossa aplicação foi a questão temporal. Como aplicamos a SD durante a IV unidade do ano letivo, alguns alunos estavam desmotivados e faltaram algumas aulas por estarem em recuperação ou por estarem passados de ano e a necessidade de encerrar o calendário letivo fez com que não pudéssemos organizar um júri na sala de aula, a fim de simular a decisão de lançar as bombas nucleares ou não sobre o Japão no final da Segunda Guerra Mundial (sugestão que deixamos para outros professores que venham a consultar este material).

Houve também uma dificuldade de aplicar esta sequência, baseada na pedagogia freireana, pois tanto os alunos quanto o professor estavam acostumados ao modelo tradicional da “educação bancária” e trazer os alunos para as discussões nos momentos de Organização do Conhecimento acabou se mostrando um grande desafio. A passividade dos alunos em

esperar que o professor lhes “deposite” determinado conhecimento foi uma constante durante muitos dos encontros.

Além das sugestões de trabalhar outros temas de Física Moderna e Contemporânea já feitas ao longo da SD, também deixamos como opção a aplicação individual de algum dos temas aqui sugeridos nos encontros, e para tanto deixamos os apêndices separados por temas. Se for a intenção de algum professor trabalhar apenas com usinas nucleares, por exemplo, poderá consultar diretamente o CAPÍTULO 4 do Produto Educacional.

Na sequência dos temas ao longo das aulas, procuramos mostrar uma conexão entre o que já havia sido trabalhado anteriormente e o que estava sendo dialogado em cada novo encontro. Deste modo, entendemos que os alunos conseguiram ter uma compreensão do conteúdo tanto na parte da abordagem contextual, quanto no conhecimento físico discutido e também em suas implicações para o desenvolvimento de sua criticidade sobre o tema.

## REFERÊNCIAS

- ANGOTTI, J. A. Conceitos Unificadores e Ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol 15, n. (1 a 4), 1993.
- ARAÚJO, Denise Lino de. O que é (e como faz) sequência didática? *Entrepalavras*, Fortaleza - ano 3, v.3, n.1, p. 322-334, jan/jul 2013.
- AULER, Decio; DALMOLIN, A. M. T. e FENALTI, V. S.. ALEXANDRIA. Abordagem Temática: natureza dos temas em Freire e no enfoque CTS. *Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, v.2, n.1, p.67-84, mar. 2009.
- AZEVEDO, M. C. P. S. D.; PIETROCOLA, M. Estudando a transposição interna a partir da teoria das situações de Brousseau. *XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*, 2008. Curitiba, PR.
- Base Nacional Comum Curricular, disponível em [http://basenacionalcomum.mec.gov.br/#/site/conhecaDisciplina?disciplina=AC\\_CIN&tipoEnsino=TE\\_EM](http://basenacionalcomum.mec.gov.br/#/site/conhecaDisciplina?disciplina=AC_CIN&tipoEnsino=TE_EM). Acessado em 22/01/2016.
- BAZZO, W. A. Ciência, Tecnologia e Sociedade: e o contexto da educação tecnológica. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1998.
- BAZZO, Walter Antonio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale; LINSINGEN, Irlan von. O que são e para que servem os estudos CTS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2000, Ouro Preto. COBENGE. Ouro Preto: ABENGE, 2000.
- BAZZO, Walter Antonio; LINSINGEN, Irlan von; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale Pereira (orgs.). Introdução aos estudos CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade). Madri, Espanha: OEI (Organização dos Estados Iberoamericanos), 2003.
- CABRAL, Giovana. *Ciência, Tecnologia e Sociedade I* / Giovana Cabral e Guilherme Reis Pereira. – Natal: EDUFRN, 2011.
- COMEGNO, Leonora M. A. *Contribuição do enfoque CTS para os conteúdos escolares de química*. (Dissertação). Curitiba, 2007.
- DELIZOICOV, D. Ensino de Física e a concepção freiriana de educação. *Revista de Ensino de Física*, v. 5, n. 2, p. 85-98, 1983
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J.A. *Metodologia do Ensino de Ciências*. São Paulo: Cortez Editora, 1990.

- DÍAZ, José Antonio Acevedo. Reflexiones sobre las finalidades de La enseñanza de las ciencias: educación científica para La ciudadanía. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* (2004), Vol. 1, N° 1, pp. 3-16.
- FERNANDES, Carolina dos Santos e MARQUES, Carlos Aberto. Ciência, Tecnologia e Sociedade e Perspectiva Freireana de Educação: possíveis convergências. *VII ENPEC*, Florianópolis, 2009.
- FREIRE, Paulo. Criando métodos de pesquisa alternativa. In: In: BRADÃO, C. R. (org.) *Pesquisa Participante*, 3ª edição. São Paulo: Brasiliense, 1983.
- FREIRE, Paulo. *Educação e Mudança*. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1979.
- FREIRE, Paulo. *Pedagogia da Autonomia: Saberes necessários à prática educativa*. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1997.
- FREIRE, Paulo. *Pedagogia do Oprimido*. 57 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 2014.
- GIORDAN, M., GUIMARÃES, Y. A. F. E MASSI, L. Uma análise das abordagens investigativas de trabalhos sobre sequências didáticas: Tendências no ensino de Ciências. *VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*, 2012.
- GUERRA, A. ET AL. Uma abordagem histórico-filosófica para o eletromagnetismo do Ensino Médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, p. 224-248, ago. 2004.
- LIMA, A. B. ; COSTA, A. C. M. . Avaliação como forma de controle e de emancipação humana. In: *IV Simpósio internacional o Estado e as Políticas Educacionais no tempo presente*, 2008, Uberlândia. O Estado e as políticas educacionais no tempo presente, 2008.
- MARTINS, Maria José D. e MOGARRO, Maria João. A Educação para a Cidadania no Século XXI. *Revista Iberoamericana de Educación*. N. 53 (2010), pp. 185-202.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Introdução. A história das ciências e seus usos na educação. Pp. xxi-xxxiv, in: SILVA, Cibelle Celestino (ed.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.
- MATTHEWS, Michael R. História, filosofia e ensino de ciências: A tendência atual de reaproximação. *Cad. Cat. Ens. Fis*, v. 12, n.3, Florianópolis, p. 164-214, Dez. Santa Catarina, 1995.

- MOREIRA, M.A. *Teorias de aprendizagem*. 2. ed.ampl., São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 2011a.
- MOREIRA, M.A. *Metodologias de pesquisa em ensino*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011b.
- MUENCHEN, C. *A disseminação dos três momentos pedagógicos: um estudo sobre práticas docentes na região de Santa Maria/RS*. 2010. 273 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Centro de Ciências em Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- NASCIMENTO, Tatiana Galietta; LINSINGEN, Irlan von. Articulações entre o enfoque CTS e a pedagogia de Paulo Freire como base para o ensino de ciências. *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 13, núm. 42, septiembre-diciembre, 2006, pp. 95-116, Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- OLIVEIRA, Fabio Ferreira de. *O Ensino de Física Moderna com Enfoque CTS: Uma proposta Metodológica para o Ensino Médio usando o tópico raios X*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: UFRJ/PPGE, 2006.
- PCN+ Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. / Secretaria de Educação Média e Tecnológica – Brasília : MEC ; SEMTEC, 2002. 144 p.
- PELANDRÉ, Nilcéia Lemos. *Efeitos a longo prazo do método de Alfabetização de Paulo Freire*. Dissertação de Doutorado. Florianópolis, 1998.
- PEREIRA, Maria Rita Nascimento. *Paulo Freire Ontem e Hoje: Da origem ao atual discurso do formador em educação de jovens e adultos do Instituto Paulo Freire*. Dissertação de Mestrado. Uberaba-MG, 2006.
- PINHEIRO, N. A. M.; SILVEIRA, R. M. C. F. e BAZZO, W. A. Ciência, Tecnologia e Sociedade: a relevância do enfoque CTS para o contexto do ensino médio. *Revista Ciência & Educação*, v. 13, n. 1, p. 71-84. 2007.
- PINHEIRO, N. A. M.; SILVEIRA, R. M. C. F.; BAZZO, W. A. O contexto científico-tecnológico e social acerca de uma abordagem crítico-reflexiva: perspectiva e enfoque. *Revista Iberoamericana de Educación*, n. 49/1, março/2009.
- SAUERWEIN, Inés Prieto Schmidt; TERRAZZAN, Eduardo A. A utilização do referencial teórico de Paulo Freire na compreensão de um processo de acompanhamento da prática pedagógica de professores de física. *V ENPEC*, Bauru/SP, 2005.

STRIEDER, Roseline Beatriz. *Abordagem CTS e Ensino Médio: Espaços de Articulação*. (Dissertação). São Paulo, 2008.

TEIXEIRA, Elder S., GRECA, Ileana Maria, FREIRE Jr, Olival. Uma revisão sistemática das pesquisas publicadas no Brasil sobre o uso didático de História e Filosofia da Ciência no Ensino de Física. In: PEDUZZI, Luiz O. Q., MARTINS, André Ferrer P., FERREIRA, Juliana Mesquita Hidalgo (Org.). *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*. Natal: EDUFRN, 2012.p. 09-40.

TOTI, F. A. ; PIERSON, A. H. C. (2010). Elementos para uma aproximação entre a Física no Ensino Médio e o cotidiano de trabalho de estudantes trabalhadores. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 15, p. 527-552

UNESCO, ABIPTI. *A ciência para o século XXI: uma nova visão e uma base de ação* – Brasília, 2003.72p.

Significado de Quotidiano, disponível em <http://www.dicionariodoaurelio.com/quotidiano>. Acessado em 22/01/2015

## **PRODUTO EDUCACIONAL**

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Universidade  
Estadual de  
Feira de Santana



## BOMBA ATÔMICA: ENSINANDO FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR NUM CONTEXTO HISTÓRICO E SOCIOCULTURAL



Marcos Vinicius Lima Souza

FEIRA DE SANTANA – BAHIA  
MAIO DE 2016

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	81
CAPÍTULO 1: SEQUÊNCIA DIDÁTICA .....	82
CAPÍTULO 2: FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR.....	92
CAPÍTULO 3: BOMBA NUCLEAR.....	113
CAPÍTULO 4: ENERGIA NUCLEAR E INDÚSTRIA .....	142
CAPÍTULO 5: ENERGIA NUCLEAR E IMPACTOS AMBIENTAIS .....	150
CAPÍTULO 6: ENERGIA NUCLEAR E MEDICINA .....	157
ANEXO A: TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO .....	171
ANEXO B: MERGULHANDO NO NÚCLEO ATÔMICO .....	175
ANEXO C: IMAGENS .....	183
ANEXO D: IMAGENS .....	191

## INTRODUÇÃO

Este Produto Educacional é resultado do trabalho de aplicação de uma Sequência Didática (SD) em uma escola da rede pública estadual de ensino da cidade de Feira de Santana, Bahia, numa turma de 3º ano do ensino médio, em que o regime de aulas por semana possui um total de 02 aulas de Física por semana. Sendo assim, a proposta para quem venha a utilizá-la é de ser trabalhada ao longo de 05 semanas, totalizando 10 aulas.

A inserção no currículo de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) através desta SD surge através de uma abordagem contextualizada sobre a Física Nuclear, a partir da bomba atômica, tratando dos benefícios e malefícios científicos, sociais, tecnológicos e ambientais do uso da Energia Nuclear, bem como de alguns conceitos de radioatividade. Para tanto, utilizamos a abordagem Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) e a História e Filosofia da Ciência (HFC), apoiadas na Pedagogia de Paulo Freire, durante a construção da Sequência Didática, a qual foi implementada para ensinar aqueles conceitos físicos.

Com esta aplicação, a pretensão foi responder ao questionamento: Como uma sequência didática pode ser elaborada para ensinar Física e Energia Nuclear utilizando o episódio da bomba atômica, como tema gerador, através de uma abordagem histórica e sociocultural?

Além das sugestões de trabalhar outros temas de Física Moderna e Contemporânea, já feitas ao longo da SD, também deixamos como opção a aplicação individual de algum dos temas aqui sugeridos nos encontros, e para tanto estruturamos os capítulos separados por temas. Se for a intenção de algum professor trabalhar apenas com usinas nucleares, por exemplo, poderá consultar diretamente o **CAPÍTULO 4**.

Na sequência dos temas ao longo das aulas, procuramos mostrar uma conexão entre o que já havia sido trabalhado anteriormente e o que estava sendo dialogado em cada novo encontro. Deste modo, entendemos que os alunos conseguiram ter uma compreensão do conteúdo tanto na parte da abordagem contextual, quanto no conhecimento físico discutido e também em suas implicações para o desenvolvimento de sua criticidade sobre o tema.

## CAPÍTULO 1

### SEQUÊNCIA DIDÁTICA

#### COMO UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PODE SER ELABORADA PARA ENSINAR FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR UTILIZANDO O EPISÓDIO DA BOMBA ATÔMICA, COMO TEMA GERADOR, ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM HISTÓRICA E SOCIOCULTURAL?

As aulas nas quais aplicamos a presente Sequência Didática estão separadas em “encontros”, nos quais foram trabalhadas temáticas diferentes. Procuramos agrupar neste formato para facilitar o entendimento da extensão do tema, pelo professor que irá aplicá-la. Em cada um dos encontros, em que apareceram os conteúdos, foi possível aplicar os Três Momentos Pedagógicos (TMP) – Problematização, Organização e Aplicação do Conhecimento. Desta forma pretende-se trabalhar um processo contínuo com o aluno, no qual ele é indagado e incentivado a participar da aula, emitindo sua opinião, seu conhecimento e dialogando com seus colegas na busca por respostas que são construídas ao longo do primeiro momento pedagógico. Neste diálogo o professor deve guiar as discussões para não haver fuga do tema proposto. Em seguida há uma maior intervenção do professor, a fim de organizar o conhecimento que estava sendo discutido anteriormente pelos e com os alunos. Desta forma aparecem formalizações teóricas e matemáticas que o conteúdo exija para seu entendimento. A partir desta organização, busca-se nas respostas iniciais dadas pelos alunos para a problematização, encontrar aplicações deste conhecimento e se discutem estas aplicações com a turma.

Utilizando esta metodologia, visamos uma abordagem contextualizada de alguns aspectos da Física Nuclear e da Energia Nuclear, usando como tema gerador a bomba atômica. Sequencialmente, trouxemos no primeiro encontro a bomba atômica, a partir de uma música e, buscamos na problematização feita, que os alunos percebessem correlações entre essa e a energia nuclear. Voltamos a falar da bomba atômica no segundo encontro, visando a discussão histórica sobre o momento de sua construção e o conhecimento da Física Nuclear por trás de sua elaboração.

No terceiro encontro abordamos um uso benéfico da Energia Nuclear, ao trabalharmos com as usinas nucleares e as políticas internacionais que existiram e existem nos países que possuem esta tecnologia, incluindo o Brasil.

Durante o quarto encontro são tratados os impactos ambientais decorrentes do espalhamento da radiação nuclear sobre uma região, abordando casos bastante divulgados, como o acidente da usina nuclear de Chernobyl, em 1986, e o vazamento da usina nuclear de Fukushima, em 2011.

Finalizando os conteúdos abordados nesta SD, o sexto encontro visa tratar da profissão de Físico Médico, ainda pouco conhecida e essencial para a própria medicina evoluir em termos de diagnósticos e tratamentos que utilizem a radiação nuclear. Após esta etapa, os alunos assistem a dois vídeos que abordam os conteúdos aqui trabalhados, incluindo o acidente com o Césio-137 que ocorreu em Goiás, em 1987, a fim de aumentar sua informação e sua criticidade sobre o conteúdo abordado nestas aulas.

## **Cronograma das aulas**

- **1º Encontro: 01 aula**

No começo da aula os alunos irão ouvir a música “Rosa de Hiroshima” composta por Gerson Conrad e Vinicius de Moraes e descrever o que entendem a partir dela sobre o que é essa “rosa de Hiroshima”. A proposta é iniciar a problematização do tema que será trabalhado (bomba atômica).

Após todos emitirem sua opinião, o professor irá introduzir uma problematização sobre o tema “bomba atômica”, tratando inicialmente de radiações. As perguntas serão feitas uma a uma e o professor estará registrando as respostas dadas para elas:

1. *Por que é perigoso ficar exposto ao Sol durante muito tempo, principalmente das 10 h às 16 h e sem passar bloqueador solar?*
2. *O que ocorre durante um exame de raios-X que nos permite ver a estrutura de nossos ossos?*
3. *O que é a bomba atômica e onde já ouviram falar dela?*
4. *A ciência e a tecnologia empregadas na bomba atômica podem estar relacionadas a algo benéfico?*
5. *Existe alguma relação entre a luz do Sol, os raios-X e uma bomba atômica?*

6. *Como os prótons que se encontram no núcleo de um átomo se mantêm próximos uns dos outros, visto que eles se repelem pela força elétrica?*

As respostas dadas irão servir de base para iniciar a discussão. O tema em questão pode ser relacionado com notícias vistas em meios de comunicação, não necessariamente uma experiência vivida pelo estudante. O objetivo é guiar a conversa para que a maior quantidade de alunos possa falar sobre suas impressões do assunto, saber das implicações que o conteúdo possa trazer para eles no que se refere ao uso da energia nuclear e aplicações desta nos contextos histórico, militar, político, científico, social, tecnológico, cultural e ético. Nesse momento o professor tem papel de mediador da conversa para que se mantenha o tema e estará analisando os saberes dos educandos através da exposição oral feita por estes. A dialogicidade aqui está ancorada no tripé educador – educando – objeto do conhecimento e busca a construção do conteúdo programático a partir do relato dos estudantes.

Sabendo que alguns termos, ou relações que se deseja trabalhar no tema, podem não aparecer durante as falas dos educandos, o educador pode usar imagens – projetadas em um slide ou outro recurso visual – para guiá-los a alguma forma de aplicação da energia nuclear que não tenha sido exposta. Como exemplo pode apresentar imagens de uma explosão nuclear – algo que provavelmente será dito no início do diálogo com os alunos – ou de uma usina nuclear ou uma pessoa fazendo uso de algum equipamento médico de radioterapia, indagando aos alunos o que representa cada imagem e qual a relação que podem fazer com o tema “bomba atômica”.

O uso de imagens ou relatos é tratado por Freire como uma “codificação” e este “código” deve representar a situação desejada. Esta atitude pretende proporcionar uma discussão sobre aplicações ou usos da energia nuclear nas seguintes áreas: bomba atômica, indústria, impactos ambientais e medicina. Como atividade para a próxima aula, há a leitura do texto “Mergulhando no núcleo atômico”, que é a aula 48 de Física do material do TELECURSO 2000 (ANEXO B).

- **2º Encontro: 02 aulas**

Formando grupos na sala – com 04 ou 05 componentes – o professor irá utilizar-se das falas anteriores dos alunos para organizar o conhecimento e aplicá-lo (segundo e terceiro momentos dos TMP).

Neste encontro a temática a ser trabalhada será a “bomba atômica” (ver CAPÍTULO 3) e as perguntas feitas na aula anterior serão respondidas ao longo dos encontros. Podem ser

lançadas novas problematizações para que os alunos discutam em seus próprios grupos antes de discutir com a sala, tais como:

1. *Quais os motivos que levaram à construção deste artefato?*
2. *Quais as consequências de seu uso?*
3. *Em que momento histórico ela foi desenvolvida?*
4. *Quais os países que a construíram?*
5. *Como a comunidade científica se posicionava diante da construção deste armamento?*
6. *Que tipo de fenômeno permite a grande liberação de energia quando uma bomba nuclear explode?*
7. *O que é uma reação em cadeia? O que provoca esta reação?*

O professor irá continuar registrando as discussões através de gravação do áudio ou vídeo, com permissão prévia dos estudantes. Também deve participar das discussões, mediando e mantendo a discussão dentro da temática trabalhada, trazendo informações quanto aos interesses políticos e militares das nações que investiam na produção deste armamento e o cenário científico – mais precisamente do desenvolvimento da Física – que proporcionou a criação de tal artefato bélico. Nesta aula, utilizando a HFC, o professor deve tratar do embate existente na comunidade científica entre os que eram a favor do desenvolvimento da bomba e os que eram contra (ver CAPÍTULO 3), bem como explicar como se dá o processo de Fissão Nuclear (CAPÍTULO 2).

A partir da leitura do material sugerido na aula anterior e das discussões na sala, o aluno produzirá um texto sobre o que aprendeu do tema para entregar ao professor. Esta atividade será analisada pelo professor e discutida com cada aluno, devolvendo-a para reformulação, se necessário, antes de atingir seu formato final.

- **3º Encontro: 02 aulas**

Nestas aulas será trabalhada a temática sobre a indústria, ou mais diretamente, as usinas nucleares (CAPÍTULO 4). O objetivo é discutir o uso da energia nuclear na indústria. Para tal, os alunos serão novamente organizados em grupos para uma primeira discussão e posterior socialização das suas impressões. A problematização se dará em torno de:

1. *Como uma usina nuclear gera energia elétrica?*
2. *O processo que ocorre em seu interior tem algo em comum com o processo de construção da bomba atômica?*

3. *Uma usina nuclear pode explodir tal qual ocorre com a bomba nuclear?*
4. *O que é massa crítica?*
5. *Quais as consequências de um vazamento em uma usina nuclear?*

Após as discussões promovidas pela problematização, o momento de organização do conhecimento trará as definições sobre materiais radioativos e massa crítica, bem como de formas de energia e suas transformações. Caso o professor deseje abordar outros conteúdos da Física Moderna e Contemporânea, pode tratar do poço de potencial, contudo não foi objetivado este tema nesta aplicação. No terceiro momento pedagógico, as perguntas elaboradas serão retomadas e, tratando das questões sociais, o professor deverá discutir sobre o quadro energético existente no mundo e no Brasil, atualizando a discussão com a crise energética que o nosso país sofre devido à alta dependência das chuvas para encher os reservatórios das hidrelétricas. Será a energia nuclear uma alternativa para a crise energética? O Brasil investe em energia nuclear? Temos usinas aqui em nosso país?

Com relação às questões políticas e militares serão feitas perguntas que gerarão uma pesquisa para ser entregue na próxima aula:

1. *Por que o Brasil não pode produzir bombas atômicas?*
2. *Qual o acordo que foi feito, e com que país, impede tal uso do urânio?*

- **4º Encontro: 02 aulas**

Este encontro se iniciará com a entrega e discussão das pesquisas sobre o acordo do Brasil com a Argentina de não produção de armamentos nucleares para que todos os estudantes tenham consciência política deste acordo. Essa pesquisa tem como objetivo organizar o conhecimento que será discutido neste encontro.

Em seguida, como já passamos por discussões sobre a bomba atômica e sobre as usinas nucleares, vamos tratar dos impactos ambientais causados pela energia nuclear (CAPÍTULO 5). Dentro do enfoque CTSA, a questão ambiental será discutida em relação às agressões causadas na natureza pelo uso tanto da bomba atômica quanto do risco de um vazamento em uma usina nuclear, já tratado na aula anterior.

Para problematizar o conteúdo os alunos serão indagados, em seus grupos, sobre:

1. *Há alguma notícia recente sobre derramamento de material radioativo na natureza?*
2. *O que acontece com o material radioativo quando há um acidente nuclear?*
3. *Quais as consequências para a fauna e flora da região atingida?*

4. *O que ocorre com o ser humano atingido pela radiação, seja de uma explosão de bomba nuclear ou de um vazamento de uma usina nuclear?*
5. *Qual é a diferença entre a radiação nuclear e outras radiações, como a ultravioleta, por exemplo?*

Durante a organização do conhecimento o professor utilizará o conhecimento do aluno durante a discussão em sala para formalizar e/ou informar sobre o conteúdo, tratando novamente de materiais radioativos, com ênfase em decaimento radioativo e interação da radiação com a matéria – aqui é sugerido para professores que venham a utilizar este material a possibilidade da inserção de outros conceitos de Física Moderna e Contemporânea, como o Efeito Fotoelétrico e o Efeito Compton, os quais não foram objetivos desta proposta.

Para aplicar o conhecimento serão discutidos os acidentes nucleares ocorridos em Fukushima, no Japão, em 2011, em Chernobyl, na Ucrânia, em 1986 e os impactos causados no Japão devido às bombas nucleares que finalizaram a II Guerra Mundial. Na realidade de nosso país será pedida para a aula seguinte uma pesquisa que terá como base o questionamento “Será que no Brasil já houve um acidente ou tragédia envolvendo radioatividade, com grande repercussão?” O professor deve evidenciar que não foi uma usina nuclear e que o material radioativo foi o Césio.

Leituras recomendada para aprofundar o conteúdo:

- [www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/04/140401\\_fukushima\\_retorno\\_moradores\\_fn](http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/04/140401_fukushima_retorno_moradores_fn)
- [http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo\\_de\\_fatos\\_sobre\\_a\\_radiacao\\_em\\_fukushima.html](http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo_de_fatos_sobre_a_radiacao_em_fukushima.html)
- <http://www.brasil.discovery.uol.com.br/enigma/imagens/chernobyl-26-anos-depois/>
- <http://ghostbusters79.blogspot.com.br/2014/06/25-fatos-assustadores-que-voce-deveria.html>
- <http://atomicbombmuseum.org/>

#### • **5º Encontro: 02 aulas**

Discussão sobre pesquisa que trata do acidente com o Césio-137 em Goiânia, Goiás, em 1987. Essa discussão deve despertar no aluno o senso crítico para o uso de materiais radioativos, gerando o tema deste encontro: a energia nuclear na medicina (CAPÍTULO 6). Trata-se, portanto de uma atividade metodológica presente no segundo momento pedagógico, para organizar o conhecimento.

Novamente com a sala dividida em grupos o professor deve começar a indagar seus alunos sobre:

1. *O que é física médica e qual a área de atuação dos profissionais com esta formação?*
2. *Quais os aparelhos médicos que vocês conhecem que utilizam radiação?*
3. *Vocês sabem que até para fazer um exame de raios-X é necessário tomar algumas precauções? Quais?*
4. *Por que é necessário entrar em um aparelho para fazer uma ressonância magnética?*

Durante essa discussão vamos tratar de aspectos tecnológicos e sociais da ciência, devido ao avanço proporcionado pela física no diagnóstico por imagens ou mesmo no tratamento de algumas doenças. Na organização do conhecimento serão tratados os conceitos e leis que regem o uso da radiação no diagnóstico por imagem e durante a aplicação do conhecimento serão respondidas as questões propostas e tratado o lado social, mencionado acima. Se o professor que estiver aplicando a sequência desejar trabalhar os tópicos de Efeito Fotoelétrico e Efeito Compton, poderá novamente tratá-los aqui, juntamente com a discussão da geração de raios X, visto que a interação da radiação com a matéria pode produzir diferentes efeitos, inclusive estes aqui citados.

Após o momento de organização do conhecimento, será passado para os alunos o vídeo “ACIDENTE NUCLEAR EM GOIÁS- RECORD” que possui 11:02 minutos de duração e foi feito pela emissora de televisão Record durante o episódio do vazamento de radiação em Fukushima e traz o assunto para a realidade do Brasil, tratando da falta de conhecimento científico por parte dos cidadãos de Goiás em 1987 e as consequências do uso inadequado do material radioativo, e mostra a realidade das usinas nucleares em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. Como o vídeo é curto – visando a não dispersão da turma caso o vídeo fosse mais longo – será mostrado também o vídeo de 08:43 minutos exibido pelo programa da emissora de televisão Globo “FANTÁSTICO - HISTÓRIA DA BOMBA ATÔMICA”, exibido no contexto em que completavam 60 anos da explosão das bombas no final da II Guerra. Este vídeo retoma o assunto da bomba atômica e trata mais uma vez de como ocorre a fissão nuclear e quais eram alguns dos cientistas envolvidos no processo de produção do armamento nuclear.

Como sugestão de atividade a ser aplicada por outros professores que consultem este material, mas que não foi feito nesta sequência por motivos temporais, fica a ideia de montar um júri simulado que poderá ser estruturado e finalizado em 04 aulas. O professor retomará o tema gerador de toda discussão – a bomba atômica – e os alunos serão divididos em três

grupos com a proposta de se fazer um grande debate na sala – um júri simulado – onde o conhecimento trabalhado até aqui será discutido como no cenário científico da produção e utilização desta arma nuclear ao fim da II Grande Guerra. Um grupo representará os cientistas que eram favoráveis à construção e utilização da bomba, outro grupo representará os cientistas contra e um terceiro grupo representará os jurados.

No próximo encontro, que poderá durar 01 aula, os alunos já deverão estar cientes de quem são estes cientistas os quais representarão no júri, portanto podem fazer uma pesquisa com o seguinte direcionamento: quais cientistas eram a favor da utilização da bomba atômica e quais eram contra? Apesar desta discussão ter sido trazida quando tratamos de HFC na aula sobre a bomba atômica, uma pesquisa feita pelos alunos trará mais informações para que eles possam desenvolver melhor este trabalho.

Nesta primeira aula com este propósito cada cientista envolvido no debate será atribuído a um aluno, o qual receberá um material para estudo que lhe dará condições de defender o ideal de seu personagem (CAPÍTULO 3). Os alunos irão estudar os argumentos destes cientistas para poder utilizá-los a fim de convencer um júri sobre lançar ou não lançar as bombas “Little boy” e “Fat man” sobre o Japão.

O professor irá coordenar cada grupo de cientistas a representar apenas aquele interesse demonstrado na época da II Guerra Mundial, lembrando que não devem ser influenciados por suas vontades pessoais. O grupo de jurados irá se responsabilizar pela organização do espaço. Será interessante que cada participante possa se caracterizar da personagem que representará, tentando tornar o trabalho o mais próximo do contexto no qual ocorreu.

Neste encontro sugiro que seja passado um documentário sobre o acidente da usina em Chernobyl com objetivo de mostrar os impactos causados pela radiação espalhada pelo vazamento do reator nuclear.

No próximo encontro – que também irá durar 01 aula – o professor poderá coordenar um ensaio individual para os grupos, de modo que um não conheça os argumentos do outro. O professor deverá observar cada personagem a fim de ajudá-lo em sua defesa.

Para a realização do júri, sugiro a utilização de 02 aulas a fim de promover uma maior discussão que poderá ser utilizada como uma das formas de avaliação dos alunos. A dinâmica de discussões onde cada cientista representado por um aluno apresenta sua ideia será guiada pelo professor, a fim de se manter o direito de todos falarem seus motivos ao júri. Para este encontro o ideal é que seja feita uma filmagem – mesmo que os demais encontros tenham gravado apenas o áudio – da qual o professor poderá fazer uso para analisar calmamente se os

alunos realmente estavam utilizando toda a discussão feita até aqui em seus aspectos científicos, sociais, históricos, éticos e políticos durante a encenação.

O júri irá julgar se a bomba deve ou não ser lançada sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki e dar sua explicação sobre sua decisão, também utilizando o conhecimento estudado e as falas apresentadas pelos colegas-cientistas.

Independente da decisão tomada, o professor utilizará um aplicativo – NUKEMAP – que mostra a explosão e os danos causados por bombas nucleares e que permite selecionar a cidade e o tipo de bomba usada (<http://nuclearsecrecy.com/nukemap3d/>). Com este aplicativo o professor poderá mostrar se a decisão tomada pelo júri salvou ou destruiu as vidas de milhares de pessoas, bem como a área afetada pela radiação, tratando de uma discussão mais ética e social.

- **6º Encontro: 01 aula**

Momento final da aplicação da Sequência Didática na qual os alunos irão dar suas opiniões sobre o que compreenderam do conteúdo em um relato escrito, de modo rápido e simples, visando à descrição do conteúdo em sua vida e como utilizá-lo nela.

Após a entrega e leitura deste texto o professor dará os resultados obtidos pelos alunos a partir dos diferentes critérios utilizados para avaliação.

## **AVALIAÇÃO**

Os instrumentos usados para avaliação dos estudantes serão:

- Participação nas discussões;
- Elaboração do texto sobre a leitura recomendada;
- Realização das pesquisas.

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Pretendia-se que esta sequência didática pudesse ensinar aos alunos alguns conhecimentos sobre radioatividade associados à Física Moderna e Contemporânea, explorando o processo de Fissão Nuclear e o que é Energia Nuclear, com seu uso benéfico e maléfico. A curiosidade que se pretendia gerar em cada encontro quando se tratava uma

temática deveria guiá-lo ao estímulo em aprender, em participar das discussões para despertar sua consciência crítica e poder tomar decisões em sua vida com base no conhecimento adquirido. O enfoque CTSA deveria lhe mostrar, juntamente com a HFC, como se dá numa abordagem contextual o ensino de ciências, especificamente de Física.

## CAPÍTULO 2

### FÍSICA E ENERGIA NUCLEAR

A estrutura do núcleo atômico passou por várias tentativas de explicação desde os estudos do físico britânico H. Moseley (1887-1915), que realizou importantes trabalhos em espectroscopia de raios X e observou, em 1915, a igualdade entre o número atômico  $Z$  e a quantidade de carga positiva dos diferentes elementos que analisou. A partir de seus estudos a tabela periódica dos elementos passou a ser ordenada pelo valor crescente do número atômico, substituindo a ordem crescente da massa atômica  $A$ , proposta por Mendeleev.

A dificuldade de se precisar a estrutura interna do átomo vem da própria evolução da ciência como construção humana, aliada à falta de uma maneira precisa de se determinar leis que descrevam uma quantidade finita, não muito grande, de partículas – não permitindo uma descrição estatística, mas também não possibilitando o uso de equações de movimento para partícula única. A tecnologia necessária para se estudar os núcleos atômicos foi se aprimorando ao longo dos anos, tendo uma resposta melhor para sua compreensão com o desenvolvimento da física quântica.

A existência dos nêutrons no interior do núcleo foi proposta em 1920 pelo físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) – o mesmo que já havia descrito em 1911 que a carga positiva do átomo não poderia estar espalhada por todo o volume, mas sim concentrada num pequeno volume, que também concentraria quase toda a massa, o qual chamou de núcleo em 1912 –, porém só foi descoberta em 1932 pelo físico britânico James Chadwick, lhe rendendo o prêmio Nobel de Física de 1935.

A composição dos núcleos, então, passou a ser reconhecida como uma quantidade  $n$  de nêutrons juntamente com uma quantidade  $Z$  de prótons, e a massa atômica  $A$  é dada pela soma de suas massas:  $A = Z + n$ . Mas surge aqui um problema se considerarmos as leis da eletrostática: prótons confinados no núcleo, em uma região minúscula, deveriam estar se repelindo e o núcleo atômico iria se desintegrar. Como é possível então explicar a estabilidade nuclear? A radioatividade emitida pelos elementos químicos e a própria estabilidade nuclear só podem ser compreendidos a partir das leis da Física Moderna e Contemporânea.

Os princípios da Física Quântica mostraram que a compreensão do comportamento dos núcleos atômicos não se dava pelas leis da Física Clássica, pois, segundo Peruzzo (2012, p. 24), “estudando as radiações e partículas emitidas constatou-se que eles possuem níveis de

energia, momentos angulares, momentos magnéticos, entre outras propriedades, semelhantes aos átomos.”

A interação entre as partículas nucleares para pequenas distâncias pode ser atrativa ou repulsiva, e atuam a força eletrostática e a força nuclear forte. Na interação entre um próton e um nêutron (Figura 01), só atua a força nuclear e à medida que aproximamos essas partículas, temos a ausência de forças, quando estão afastados de uma grande distância; quando se encontram a uma distância muito pequena, a força nuclear forte os atrai – a energia potencial  $U$  é negativa – e quando estão praticamente encostados, eles se repelem – energia potencial positiva – impedindo que entrem em contato.

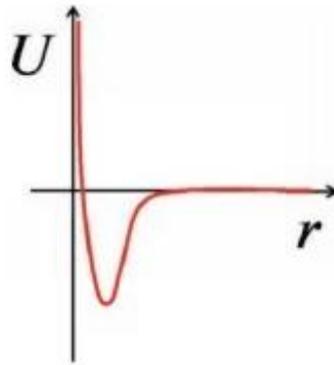


Figura 01: Energia potencial entre 1 próton e 1 nêutron

A interação entre dois prótons (Figura 02) apresenta, além da força nuclear forte, a força eletrostática. À medida que aproximamos as partículas eletricamente iguais, estas se repelem devido à força coulombiana – energia potencial positiva. A partir de uma determinada distância, a ação da força nuclear forte supera a força elétrica e os prótons passam a se atrair – energia potencial negativa. Quando estão quase encostados, a força resultante passa a ser novamente positiva, impedindo que eles se encostem ou entrem um na estrutura do outro.

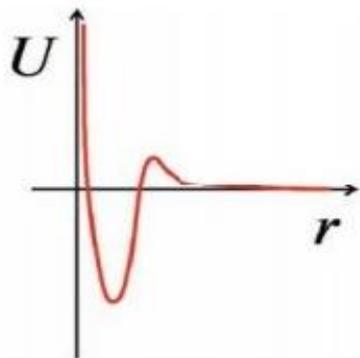


Figura 02: Energia potencial entre 2 prótons

A estabilidade nuclear fica ainda mais difícil com o aumento do número atômico  $Z$ , pois são mais prótons dentro do núcleo causando uma repulsão ainda maior. Para não desintegrar, os núcleos de maior massa atômica possuem maior quantidade  $n$  de nêutrons do que de prótons, perdendo a razão existente para os átomos de pequena massa nos quais  $Z = n$ , como podemos ver na Figura 03. Os nêutrons minimizam a ação da força eletrostática, pois sofrem força apenas atrativa.

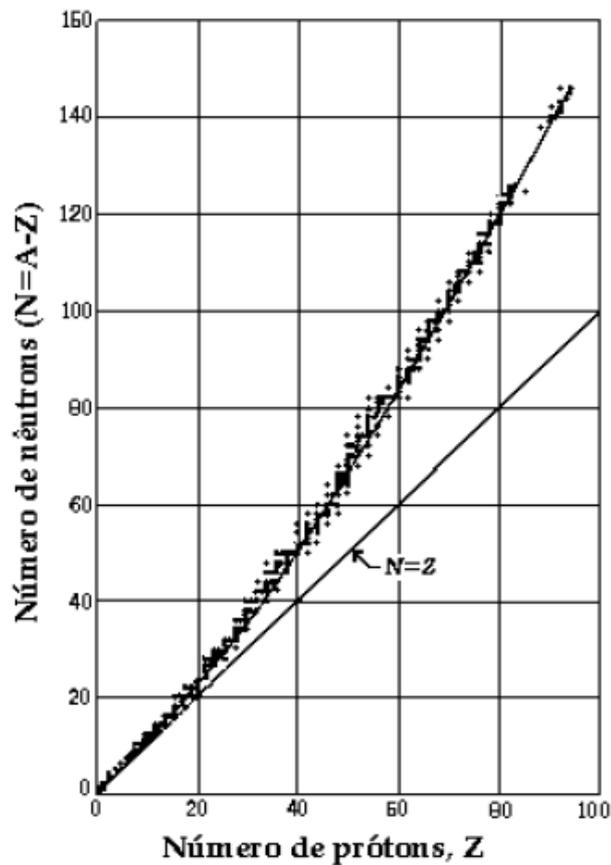


Figura 03: Numero de nêutrons em função do numero de prótons dos núclídeos estáveis. (BRAYNER *et al.*, 2003, p. 7 )

Os núcleos que estão fora da região de estabilidade nuclear tendem a se desintegrar espontaneamente para se tornarem estáveis. O Bismuto possui o núcleo estável com maior número de prótons ( $Z = 83$ ) e contém 126 nêutrons. Todos os núcleos com mais de 83 prótons, como, por exemplo, o urânio ( $Z = 92$ ) são instáveis. A desintegração espontânea apresentada pelos núcleos foi denominada de radioatividade.

Uma forma de determinar a estabilidade nuclear de um núcleo é através da energia de ligação, a qual representa a energia necessária para manter os prótons e os nêutrons no interior do núcleo e equivale à energia necessária para desintegrá-lo. Essa energia é dada pela equação (1):

$$E = (Z.m_p + n.m_n - M_N).c^2 \quad (1)$$

onde  $m_p$  representa a massa do próton,  $m_n$  a massa do nêutron,  $M_N$  a massa do núcleo e  $c$  representa a velocidade da luz no vácuo. Contudo, a massa do núcleo é sempre ligeiramente menor que a soma das massas dos prótons e nêutrons. Segundo Peruzzo:

*A massa de um átomo pode ser medida com bastante precisão com um instrumento conhecido como espectrômetro de massa. No caso do núcleo, consta-se que sua massa total é sempre menor do que a soma das massas de seus núcleons. Nos espectrômetros geralmente mede-se a massa do átomo e não a massa do seu núcleo apenas. (PERUZZO, 2012, p. 32)*

Quando os prótons e nêutrons se unem para formar um núcleo, parte de sua massa é transformada em energia e essa relação é dada pela equação (2) proposta pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) em 1905, a qual o tornou bastante conhecido ao redor do mundo, até os dias atuais:

$$E = \Delta m.c^2 \quad (2)$$

na qual  $\Delta m$  representa a diferença entre a soma das massas dos prótons e nêutrons e a massa do núcleo, chamado de déficit de massa.

A partir do átomo mais estável de cada elemento químico foi traçado o gráfico da energia de ligação por núcleon,  $E/A$ , em função da massa atômica,  $A$  (Figura 04). A Energia de ligação por núcleon representa a energia média necessária para arrancar uma partícula do núcleo. É utilizada aqui a unidade eV (elétron-Volt) para a energia no lugar do J (joule) em virtude dos pequenos valores encontrados para essa energia ( $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ).

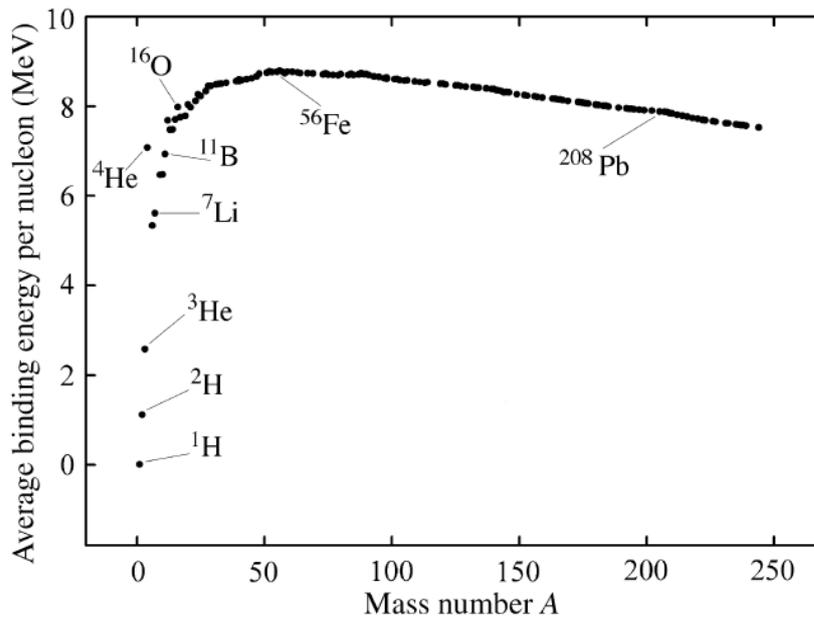


Figura 04: Energia de ligação por núcleon em função do número de massa A para o núcleo mais estável. (MARTIN, 2006, p. 36)

Uma análise do gráfico permite determinar que os valores da energia crescem rapidamente para os elementos leves, até atingir um máximo (cerca de 8,7 MeV) em torno de  $A = 60$ . A partir daí, decresce lentamente na região dos elementos mais pesados atingindo cerca de 7,6 MeV. Essa redução se deve ao fato da força nuclear ter ação apenas em pequenas distâncias enquanto que a força elétrica continua atuando infinitamente.

A energia armazenada no núcleo devido à força nuclear forte foi objeto de estudo de vários cientistas durante as décadas de 1930 e 1940. Feynman (2005) trata dessa força como forma de manter o núcleo coeso:

Descobriu-se que a coesão do núcleo se deve a forças enormes. Quando liberadas, a energia emitida é tremenda comparada com a energia química, na mesma razão da explosão da bomba atômica para uma explosão de dinamite, pois a bomba atômica diz respeito a mudanças dentro do núcleo, ao passo que a explosão de dinamite diz respeito a mudanças de elétrons no exterior dos átomos. A questão é: quais são as forças que mantêm coesos os prótons e os nêutrons no núcleo? Assim como a interação elétrica pode ser associada a uma partícula, um fóton, Yukawa sugeriu que as forças entre nêutrons e prótons também têm alguma espécie de campo e que, quando esse campo se agita, se comporta como uma partícula. Desse modo poderia haver outras partículas no mundo além de prótons e nêutrons, e ele foi capaz de deduzir as propriedades dessas partículas a partir das características já conhecidas das forças nucleares. Por exemplo, previu que deveriam ter uma massa duzentas ou trezentas vezes superior à do elétron; e eis que nos raios cósmicos foi descoberta uma partícula com a massa certa! Porém, mais tarde

descobriu-se que era a partícula errada. Foi denominada de méson  $\mu$  ou múon.

Entretanto, pouco depois, em 1947 e 1948, outra partícula foi encontrada, o méson  $\pi$  ou pión, que satisfaz o critério de Yukawa. Portanto, além do próton e do nêutron, para obter forças nucleares precisamos acrescentar o pión. [...] Acontece que os cálculos envolvidos nessa teoria [nucleodinâmica quântica] são tão difíceis que ninguém jamais conseguiu descobrir as consequências da teoria ou verificá-la experimentalmente, e isto vem se estendendo por quase vinte anos! (FEYNMAN, 2005, p.66)

As reações químicas são fenômenos nos quais os elétrons periféricos de um material se reagrupam com outro material e formam uma substância diferente. Já nas reações nucleares ocorrem modificações no núcleo atômico, como no processo de fissão nuclear.

A ideia concebida pelo físico teórico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) foi, então, de explicar a força nuclear forte de modo semelhante ao que era conhecido em outras interações e, portanto, necessitava da existência de uma partícula, que recebeu a nomenclatura de *méson* por possuir massa intermediária entre a dos núcleons e a do elétron. Após publicar seu trabalho em 1935 (Figura 05), Yukawa passa a trabalhar em outros projetos e só retorna aos estudos sobre o méson em 1937, quando é detectada nos raios cósmicos (radiação vinda do espaço) uma partícula que poderia ser a que ele havia previsto, a qual recebe em 1939 o nome de *mésotron*.

A partir de então a comunidade científica começou um grande dilema: haveria um ou dois mésons? Tal inquietação envolveu físicos teóricos e experimentais que procuravam no *mésotron* as características descritas por Yukawa.

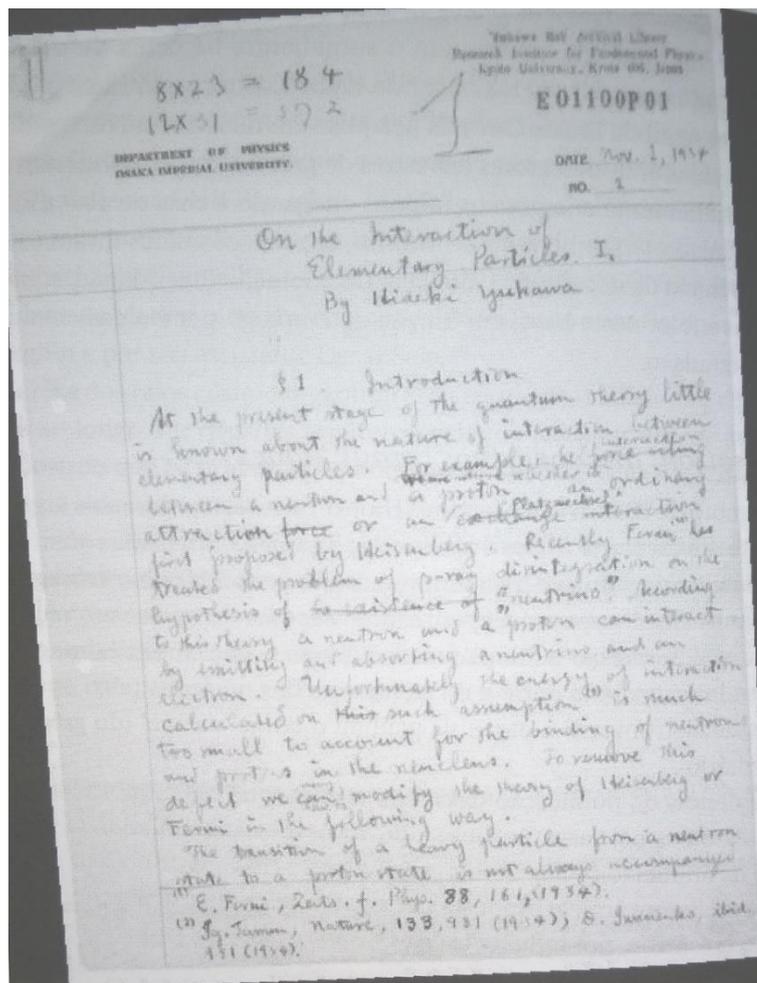


Figura 05: Manuscrito de Yukawa do artigo publicado em 1935 no qual ele expõe a ideia de partícula que seria responsável pela força que manteria o núcleo atômico coeso (Crédito: *Yukawa Hall Archival Library*). (VIEIRA, 2012, p.138)

Entra em cena o físico brasileiro Cesar Lattes (1924-2005), que estudava os raios cósmicos aqui no Brasil através de uma câmara de nuvens na qual detectava partículas subatômicas com carga elétrica. Lattes recebe em 1945 de seu ex-professor, o italiano Giuseppe Occhialini (1907-1990) uma chapa fotográfica especial, denominada emulsão nuclear. Occhialini trabalhava então na Inglaterra e consegue uma bolsa para Lattes em Bristol, onde trabalhará no grupo do físico britânico Cecil Powell (1903-1969), que viria a ganhar o Nobel em 1950 por conta destas pesquisas.

No final de 1946, Lattes pediu a Occhialini - que naquele momento saía de férias para esquiar no Pic Di Midi, nos Pirineus franceses - que levasse consigo e expusesse aquela grande altitude lotes (com e sem boro) de emulsões nucleares. Cerca de um mês depois, já em Bristol, as chapas com boro movimentariam o cotidiano - muitas vezes, monótono - do H. H.

Wills. Naquelas chapas, a equipe de físicos e mulheres microscopistas encontrou os chamados mésons, partículas com massa intermediária entre a do elétron e do próton. Os trabalhos com esses resultados foram publicados no início de 1947 e deram àquele laboratório inglês fama mundial nos anos a seguir - e um Nobel a Powell em 1950. (VIEIRA, 2015, p. 147)

Este experimento comprovou a existência dos dois mésons: o méson  $\mu$  e o méson  $\pi$ , finalizando a dúvida – chamada controvérsia píon-múon – de uma década de pesquisas sobre estas partículas. Contudo, a divulgação da descoberta dos mésons e a premiação dada a Powell deixaram de lado a contribuição de cientistas importantes, dentre eles Cesar Lattes.

[Giuseppe] Occhialini imediatamente pegou poucas placas recobertas com as novas emulsões – cerca de 2 dúzias, cada uma com 2 cm x 1 cm de área, com emulsões cuja espessura era de aproximadamente 50 microns – e as expôs no observatório francês nos Pirineus, no Pic Du Midi, a altitude de 3000 m. Quando elas foram trazidas de volta a Bristol e processadas quimicamente, ficou imediatamente claro que um mundo inteiramente novo havia se revelado. A trajetória de próton lento tinha grãos tão comprimidos uns contra os outros que ela parecia haste sólida de prata, e o pequeno volume de emulsão parecia, sob o microscópio, estar cheio de desintegrações produzidas por partículas rápidas de raios cósmicos cuja energia era muito maior que aquela que podia ser gerada artificialmente naqueles tempos. Foi como se, repentinamente, tivéssemos adentrado um pomar cercado por muros, onde árvores houvessem florescido até então protegidas, e todos os tipos de frutas exóticas amadurecido em grande profusão. (VIEIRA, 2012, p. 11 e 12)

A transmutação nuclear (transformação de um elemento em outro por processo de fissão ou de fusão nuclear, onde este passa de um estado de menor para outro de maior energia de ligação) ocorre nas regiões de elementos de menor massa atômica, onde é mais provável o processo de fusão, liberando energia, e na região de núcleos mais pesados ( $A > 60$ ), na qual é mais fácil separar o núcleo em elementos menores – fissão –, liberando mais uma vez energia. Como nos dois casos há liberação de energia, ambos podem ser usados para a construção de reatores de geração de energia ou para a construção de bombas com extremo poder de destruição. Os núcleos dos elementos que aparecem na parte superior da curva (Figura 04) são os mais estáveis, visto que são os que possuem maior energia de ligação por núcleon.

Os núcleos instáveis, que são denominados radioativos, liberam energia através do processo de decaimento radioativo, o qual pode ocorrer pela emissão de partículas alfa ( $\alpha$ ), partículas beta ( $\beta$ ) ou de radiação gama ( $\gamma$ ) – radiações nucleares. O número de decaimentos de um núcleo por unidade de tempo é dado pela equação (3):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

onde  $N_0$  representa o número de núcleos radioativos de uma substância e  $N(t)$  a quantidade de núcleos radioativos após um tempo  $t$ . A grandeza  $\lambda$  representa uma característica do material e é chamada de constante de decaimento. Segundo Bassalo (1999, p. 307), essa equação – lei da desintegração radioativa – foi apresentada em 1905 pelo físico austríaco Egon Ritter von Schweider no Premier Congrès de Radiologie ocorrido em Liège na França e a constante  $\lambda$  se relaciona com o tempo  $T$  de meia vida de uma amostra radioativa através da equação (4):

$$T \cdot \lambda = 0,693 \quad (4)$$

- Decaimento  $\alpha$

As partículas alfa são núcleos de Hélio, possuindo, portanto, 2 prótons e 2 nêutrons em sua constituição e massa atômica  $A = 4$ . Segundo Oliveira (2005, p. 372), podemos representar um decaimento alfa de um núcleo genérico X, pela equação (5):



As partículas têm baixo poder de penetração, mas se forem absorvidas diretamente pela medula óssea, causam leucemia. Segundo Peruzzo (2012, p. 44):

As radiações  $\alpha$  possuem velocidade na faixa de 20.000 km/s e têm baixo poder de penetração, não conseguindo atravessar uma folha de papel. No ar atmosférico sua propagação é mínima, não excedendo alguns poucos centímetros. Não penetra na pele humana e produz danos apenas quando o material radioativo é ingerido e desintegrado no interior do organismo. Excetuando-se a fissão, a emissão de partículas  $\alpha$  pelo núcleo é o único tipo de decaimento radioativo espontâneo que emite partículas pesadas.

Apesar de não possuir um valor fixo de energia para todos os elementos (Tabela 01), as partículas  $\alpha$  possuem um valor de energia menor que o potencial atrativo da força nuclear forte no interior do núcleo e, classicamente, não poderia escapar (Figura 06). Contudo, é possível se detectar a emissão dessas partículas por vários núcleos radioativos, e sempre com energia inferior à da barreira de potencial. Para explicar a ocorrência deste fenômeno é

necessário que ocorra o tunelamento<sup>1</sup>, um efeito quântico no qual uma partícula consegue sair de uma região cercada de barreiras de potenciais, mesmo que sua energia seja inferior à energia da barreira.

Isotope	$K_\alpha$ (MeV)	$t_{1/2}$	$\lambda$ (s <sup>-1</sup> )
<sup>232</sup> Th	4.01	$1.4 \times 10^{10}$ y	$1.6 \times 10^{-18}$
<sup>238</sup> U	4.19	$4.5 \times 10^9$ y	$4.9 \times 10^{-18}$
<sup>230</sup> Th	4.69	$7.5 \times 10^4$ y	$2.9 \times 10^{-13}$
<sup>241</sup> Am	5.64	432 y	$5.1 \times 10^{-11}$
<sup>230</sup> U	5.89	20.8 d	$3.9 \times 10^{-7}$
<sup>210</sup> Rn	6.16	2.4 h	$8.0 \times 10^{-5}$
<sup>220</sup> Rn	6.29	56 s	$1.2 \times 10^{-2}$
<sup>222</sup> Ac	7.01	5 s	0.14
<sup>215</sup> Po	7.53	1.8 ms	$3.9 \times 10^2$
<sup>218</sup> Th	9.85	0.11 $\mu$ s	$6.3 \times 10^6$

Tabela 01: Energia (K) de partículas alfa emitidas por alguns elementos radioativos, seus tempos de meia vida ( $t_{1/2}$ ) e da constante de decaimento ( $\lambda$ ). (KRANE, 2012, p. 389)

As partículas  $\alpha$  que conseguem sair do núcleo, provavelmente, se aproximaram da barreira e tentaram atravessá-la inúmeras vezes antes de conseguir “descobrir” um caminho através do efeito túnel.

<sup>1</sup> Para saber mais sobre tunelamento, consulte: a) HALLIDAY, David; RESNICK; WALKER, Jearl. *Fundamentos de física*, volume 4: óptica e física moderna. 8ª edição. Tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. – Rio de Janeiro: LTC, 2009, p. 203-206; b) ALCÁCER, Luís. *Introdução à química quântica computacional*. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2007, p. 55-57; c) BASDEVANT, J.-L., RICH, J., SPIRO, M. *Fundamentals in Nuclear Physics – From Nuclear Structure to Cosmology*. Springer Verlag, New York, 2005.p. 94-98, 290-292; d) MARTIN, Brian. R. *Nuclear and Particle Physics*. John Wiley & Sons, Ltd. 2006, p. 59-61.

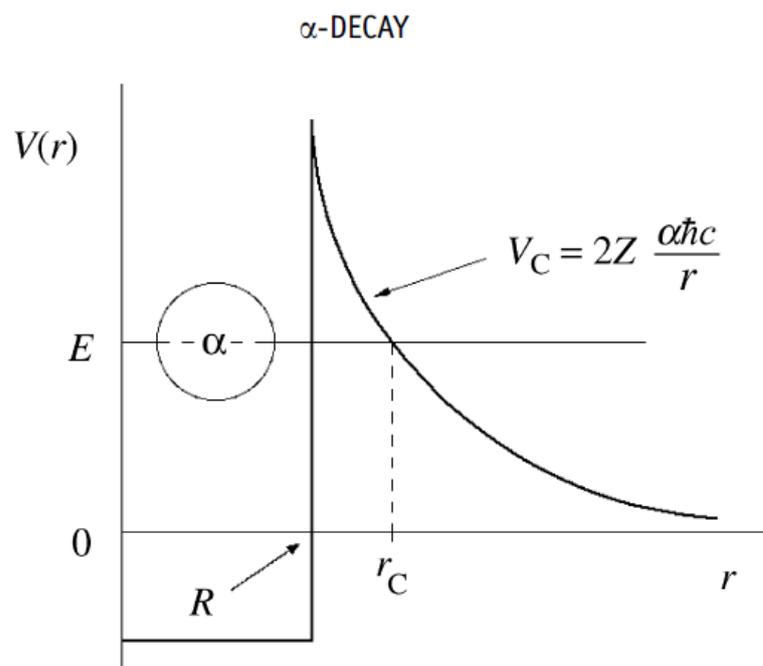


Figura 06: Diagrama esquemático da energia de uma partícula  $\alpha$  em função da distância  $r$  do centro do núcleo. (MARTIN, 2006, p. 239)

Na Figura 05 a equação apresentada para o potencial na parte externa ao núcleo ( $r > R$ ) representa o potencial coulombiano:

$$V(r) = \frac{K \cdot Q \cdot q}{r} \quad (6)$$

- Decaimento  $\beta$

As partículas  $\beta$  correspondem a elétrons que são emitidos do núcleo atômico. A incoerência de não existir elétrons no núcleo é respondida pela desintegração de um nêutron ( $n$ ) em um próton ( $p$ ) e um elétron ( $e^-$ ), quando o núcleo possui um número insuficiente ou excessivo de nêutrons para se manter estável.



Porém os cientistas se depararam com um enorme problema por quase duas décadas: a lei de conservação do momento angular não estava sendo obedecida e os valores de energia das partículas  $\beta$  não eram valores discretos como os valores encontrados para as partículas  $\alpha$ . O

espectro contínuo da energia cinética (Figura 07) foi explicado por Wolfgang Pauli, que solucionou também o problema da não conservação do momento, através da proposta de existência de mais uma partícula no processo de desintegração do nêutron: o *neutrino* ( $\nu$ ). Esta partícula não possui cargas elétricas e sua massa de repouso é zero, tal qual o fóton.

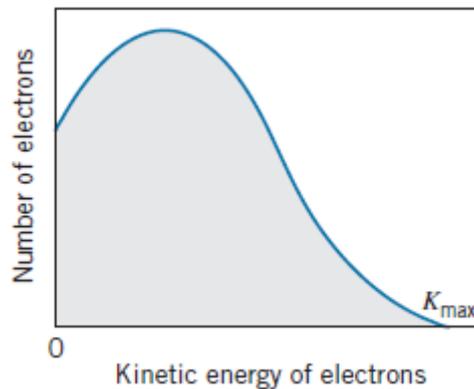


Figura 07: Espectro de emissão de elétrons (partículas  $\beta^-$ ) em função da energia cinética. (KRANE, 2012, p. 391)

Para um elemento genérico X, podemos descrever a equação (8) de emissão de uma partícula  $\beta^-$  da seguinte forma:



Contudo, o decaimento  $\beta$  pode aparecer de outras formas. Existe além da emissão de um elétron, a emissão de um pósitron ( $e^+$ ), que é a antipartícula do elétron, possuindo mesma massa, porém carga de sinal oposto. Quando um próton (p) se desintegra, dá origem a um nêutron (n) e um pósitron, juntamente com um neutrino ( $\nu$ ).



Para um elemento X genérico, podemos descrever a equação (10):



Assim como a partícula  $\beta^-$  possui um espectro contínuo para a energia, as partículas  $\beta^+$  também possuem (Figura 08):

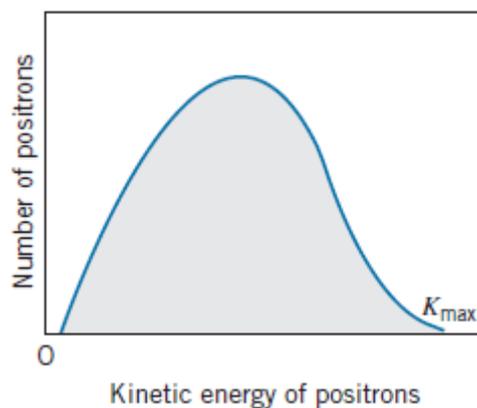


Figura 08: Espectro dos pósitrons emitidos no decaimento beta. (KRANE, 2012, p. 393)

Há também o fenômeno da captura eletrônica, na qual um próton (p) captura um elétron (e) da camada eletrônica mais próxima do núcleo, dando origem a um nêutron (n). Estes elétrons exibem uma pequena probabilidade de se encontrarem no interior do núcleo, por isso é possível ocorrer este fenômeno.



Representando a captura eletrônica numa reação nuclear para um elemento genérico X, temos:



Como um elétron da camada mais próxima do núcleo é capturado, fica uma vacância que será preenchida por um elétron de um nível mais externo. Neste processo ocorre, geralmente, a emissão de radiação X.

Com relação ao poder de penetração das partículas  $\beta$ , Peruzzo (2012, p. 47) afirma:

As radiações beta apresentam velocidades próximas a velocidade da luz, 290.000 km/s. seu poder de penetração é bem maior que as partículas  $\alpha$ , pois possuem menor massa, conseguindo penetrar 2 mm no chumbo e de 1 cm a 2 cm na pele humana.

Por conta de sua velocidade ser próxima à da luz, as partículas beta têm sua energia tratada por meios da teoria da relatividade.

- Decaimento  $\gamma$

A radiação gama é uma onda eletromagnética e, por isso, não possui carga nem massa. Sua emissão a partir do núcleo se dá após um decaimento alfa ou beta, quando o núcleo ainda está instável com excesso de energia e emite fótons na forma de radiação gama, ou mesmo quando não há emissão de partículas anteriormente e os raios gama são emitidos com a mesma finalidade. Segundo Aquino (2012, p. 63), podemos usar este fenômeno na área médica:

Um exemplo muito comum é o  $^{99m}\text{Tc}$  (tecnécio metaestável de massa 99), muito utilizado na medicina nuclear. Um paciente que é submetido a um exame usando o  $^{99m}\text{Tc}$  ingere esse elemento radioativo e, dentro do organismo, o  $^{99m}\text{Tc}$  emite um raio gama de 140,5 keV e se transforma em  $^{99}\text{Tc}$  (tecnécio de massa 99). A radiação gama emitida é utilizada na produção de imagens de dentro do organismo. O  $^{99}\text{Tc}$  formado no processo fica no corpo pouco tempo e logo é excretado sem danos para a saúde do paciente.

O processo de emissão desta radiação é semelhante aos saltos quânticos que elétrons realizam na eletrosfera do átomo, porém a quantidade de energia aqui envolvida é muito maior, estando numa faixa que varia de 0,1 MeV até 10 MeV. Com relação ao poder de penetração, Peruzzo (2012, p. 52) afirma que “possuem enorme poder de penetração, chegando a 5 cm no chumbo e até 30 cm no aço. Quando atua sobre o corpo humano, ela é capaz de atravessá-lo por inteiro, o que evidencia que pode causar grandes danos.” Na Figura 09 temos um exemplo de decaimento gama, no qual a energia desta radiação é determinada pela diferença de energia entre os níveis inicial e final.

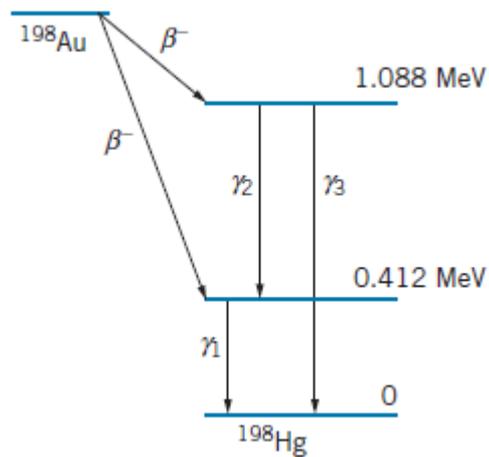


Figura 09: Alguns raios gama emitidos após um decaimento beta. (KRANE, 2012, p. 395)

Enquanto as partículas alfa e beta são ionizantes, a radiação gama é indiretamente ionizante, pois os elétrons que têm o poder de ionizar o meio não saem diretamente do núcleo e surgem da interação dos raios gama com a matéria. Outras formas de radiação, como os raios X, não são classificadas como radiações nucleares, pois não surgem no núcleo do átomo e sim na eletrosfera.

- Fissão Nuclear

O processo de fissão nuclear pode ser espontâneo ou forçado através de alguma reação. Segundo Basdevant, Rich e Spiro (2005, p. 285):

*Fissão é a quebra espontânea ou induzida de um núcleo. Enquanto ela é “apenas outra reação”, segundo a física, ela tem um papel especial nos assuntos públicos devido a sua enorme aplicação em produção de energia e armamentos. (tradução livre)*

A fissão espontânea ocorre quando um núcleo se quebra e origina dois núcleos de massas parecidas, sem que seja necessária qualquer ação externa. Geralmente os produtos da fissão nuclear são acompanhados de um ou mais nêutrons.

A percepção do processo e das suas aplicações surgiu a partir da tentativa de criar elementos mais pesados, com número atômico superior ao do urânio ( $Z > 92$ ), que foi o objetivo de pesquisa de alguns cientistas durante a década de 1930. Os físicos italianos Enrico Fermi (1901-1954) e Emilio Segrè (1905-1989) utilizavam nêutrons para bombardear sais de urânio ( $^{235}\text{U}$ ), devido à ausência de carga desta partícula. O uso de partículas alfa ou prótons

foi descartado devido à repulsão que estas partículas sofreriam do núcleo. Nesses experimentos eram utilizados nêutrons térmicos, que são nêutrons com energia próxima de 0,04 eV e estão em equilíbrio térmico com o meio que os rodeia. Em 1934, em Roma, eles acreditaram ter encontrado o elemento com número atômico  $Z = 93$ , mas não perceberam que haviam, na verdade descoberto a fissão nuclear. Em 1935, a química alemã Ida Eva Noddack (1896-1978) percebeu uma falha na interpretação do resultado obtido por Fermi e Segrè, mas a comunidade científica não considerou seus argumentos e métodos tão precisos a ponto de considerar que o urânio estaria se fragmentando devido ao bombardeamento dos nêutrons. Somente em 1938 o químico alemão Otto Hahn (1879-1968) juntamente com o físico alemão Fritz Strassmann (1902-1980) descobriram, acidentalmente, evidências da existência de bário ( $^{56}\text{Ba}$ ) após o bombardeamento do urânio com nêutrons. Vale lembrar que o bário possui massa muito menor que o urânio, indicando que este elemento estava sofrendo um processo até então desconhecido de transmutação. Neste mesmo ano, a física austríaca Lise Meitner (1878-1968), que estudava radioatividade sob orientação de Otto Hahn e foi injustiçada por não receber o Nobel de Química de 1944 sobre a descoberta da fissão – destinado apenas a Otto Hahn –, encontrou-se com seu sobrinho, o físico austríaco Otto Robert Frisch (1904-1979), e discutiu sobre a descoberta do bário. Estudando o problema, perceberam que o bombardeamento do urânio com nêutrons térmicos o quebrava em duas partes – um núcleo de bário  $^{141}_{56}\text{Ba}$  e um de criptônio  $^{92}_{36}\text{Kr}$  – e liberava 2 ou 3 nêutrons, conforme equação (13):



Esta é apenas uma das muitas reações que podem ocorrer com urânio ao ser bombardeado por um nêutron. A formação do  $^{236}_{92}\text{U}$  gera os produtos finais a partir da fissão, pois este é um núcleo muito instável. Observa-se que os núcleos gerados pertencem a dois grupos, mas ainda não há uma explicação teórica para isso:

- Uma parte com  $A \approx 95$  e  $Z \approx 36$  (Br, Kr, Sr, Zr)
- Uma parte com  $A \approx 140$  e  $Z \approx 54$  (I, Xe, Ba)

Segundo Basdevant, Rich e Spiro (2005), antes de alcançar a estabilidade o  $^{235}\text{U}$  passa por alguns processos de decaimento beta, gerando produtos de meia-vida curta, porém em uma das transformações, pode-se gerar o  $^{137}\text{Cs}$ , que possui meia vida de aproximadamente 30 anos e é importante para o armazenamento de resíduos de reatores nucleares.

Através da equação (2) de Einstein, Lise Meitner e Otto Frisch calcularam a energia liberada pela fissão de cada átomo de  $^{235}\text{U}$ . O resultado foi surpreendente, pois a quantidade de energia de 200 MeV que encontraram é milhões de vezes superior à energia liberada em reações químicas. A partir da energia de ligação por núcleon (Figura 04) podemos determinar que a energia liberada quando o urânio sofre fissão é cerca de 0,9 MeV por núcleon – diferença entre a energia de ligação do  $^{235}\text{U}$  e seus produtos de menor massa. Como este núcleo possui 235 núcleons, temos a energia encontrada por Lise e Frisch de 200 MeV.

Nesta época, Otto Frisch havia saído da Alemanha devido à ascensão do nazismo e trabalhava em Copenhague, Dinamarca, com Niels Bohr (1885-1962), e compartilhou com ele o conteúdo discutido com sua tia. Fazendo uma analogia com a divisão celular de uma bactéria, Frisch chamou o processo descoberto de fissão do urânio. Bohr acabou levando esta informação para os Estados Unidos, para onde fez uma viagem de 5 meses já prevista anteriormente. De acordo com Peruzzo,

No final de 1939 Bohr encontrou-se com Fermi e juntos divulgaram seus resultados numa mesma conferência. Em março do mesmo ano a equipe de Fermi confirmou a previsão de que o número médio de nêutrons produzidos em cada fissão estava entre 2 e 3, o suficiente para garantir uma reação em cadeia. (PERUZZO, 2012, p. 109-110)

A reação em cadeia confirmada por Fermi e sua equipe é a base para o funcionamento dos reatores nucleares tanto nas usinas de produção de energia, quanto nas armas nucleares, como a bomba atômica.

Em 1939 Bohr e o físico estadunidense John Wheeler (1911-2008) explicaram de forma detalhada o processo de fissão nuclear, através de um artigo, o qual ficou conhecido como a teoria de Bohr-Wheeler. Segundo essa teoria não há um equilíbrio entre a força de repulsão elétrica e a força de atração nuclear na maioria dos núcleos atômicos, pois a força nuclear é mais intensa, mas o urânio se comporta de maneira diferente quando sofre uma deformação. Quando esticado (Figura 10), a força elétrica se torna mais intensa, levando ao rompimento (fissão) do núcleo.

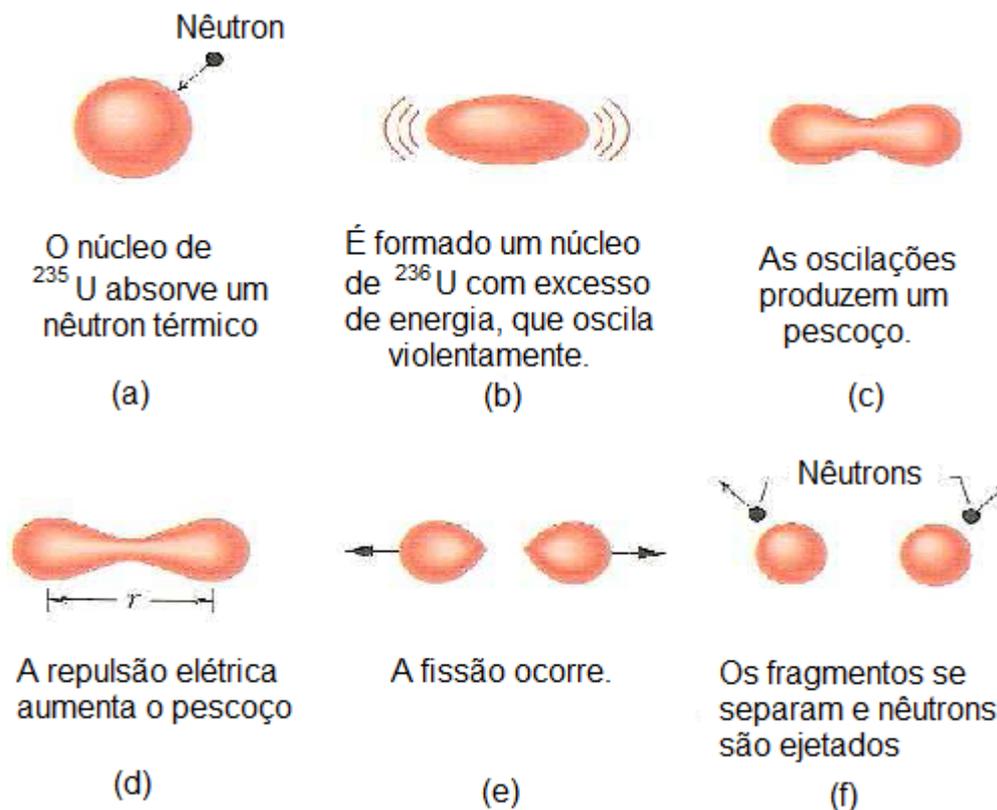


Figura 10: Os vários estágios de um processo típico de fissão, de acordo com o modelo coletivo de Bohr e Wheeler. (HALLIDAY, 2009, p. 340)

Bohr e Wheeler fizeram uma analogia com uma gota de líquido carregada eletricamente para explicar as propriedades da fissão. Quando o núcleo é bombardeado com o nêutron (Figura 10-a), este fica confinado num poço de potencial associado à interação forte que há dentro do núcleo. Com a transferência de energia do nêutron para o núcleo (Figura 10-b), este sai de seu estado de repouso e oscila, provocando um alargamento em suas dimensões (Figura 10-c). A força nuclear entre os prótons e os nêutrons continua atuando, mas é superada pela força de repulsão elétrica entre os prótons (Figura 10-d) que provoca a fissão do núcleo (Figura 10-e). Os fragmentos são ejetados (Figura 10-f) com energia cinética proveniente da energia potencial de ligação que havia originalmente, juntamente com nêutrons. A energia média liberada no processo equivale aos 200 MeV, o valor encontrado por Lise Meitner e Frisch.

Para conseguir superar a atração da força nuclear, é necessário superar uma barreira de potencial, chamada barreira de fissão. A energia de ativação,  $E_A$ , necessária para isto é da ordem de 6 a 7 MeV, para um núcleo de massa atômica em torno de 240, e equivale à diferença entre o valor máximo da barreira e a energia inicial do núcleo. Na Figura 11

podemos perceber que à medida que o núcleo se alonga há um acréscimo de energia – necessário para a fissão – e após a força elétrica superar a força nuclear, as distâncias entre os prótons vão se tornando maiores, reduzindo o valor da força elétrica. Segundo Basdevant, Rich e Spiro (2005) e Martin (2006), um núcleo que sofra fissão espontânea precisa sofrer o efeito de tunelamento quântico para ultrapassar a barreira.

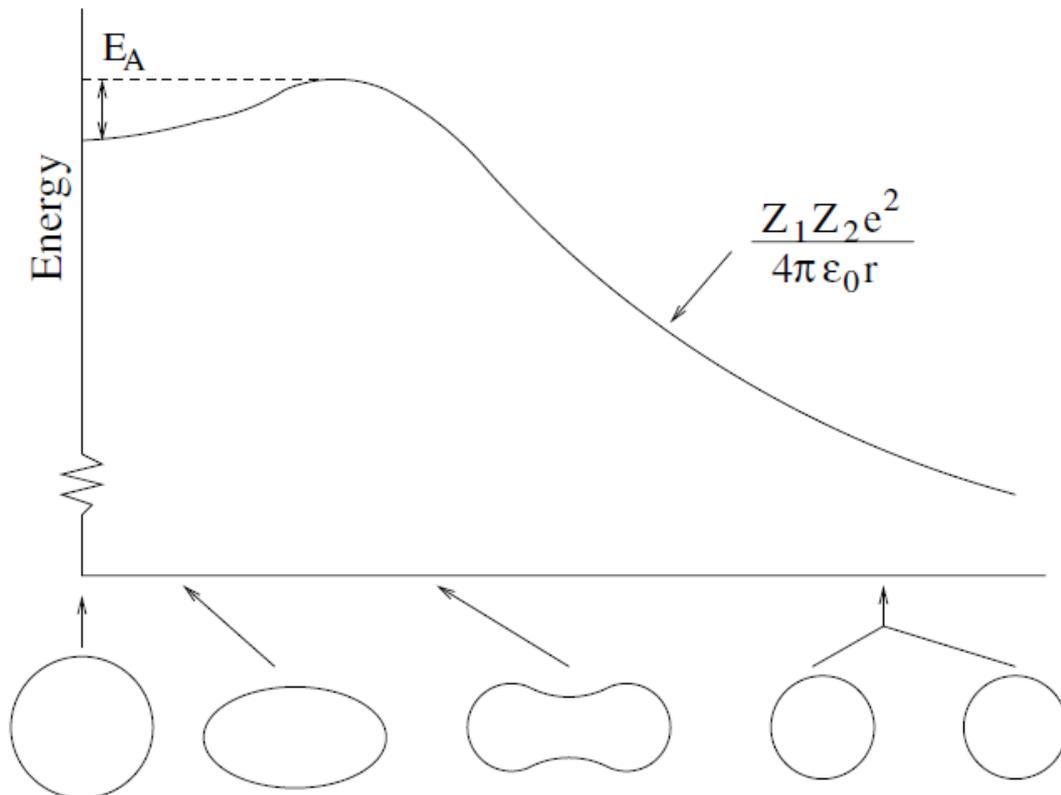


Figura 11: Variação da energia de um núcleo deformado em função da distorção, como esboçado. Para pequenas deformações, a energia aumenta com o aumento da deformação devido ao aumento da área de superfície. Quando os dois fragmentos são separados, a energia cai com o aumento da separação por causa da energia Coulomb diminuindo. Uma barreira de energia  $E_A$  deve ser cruzada para ocorrer a fissão. (BASDEVANT, RICH e SPIRO, 2005, p. 291)

Para o nosso caso estudado, o nêutron atirado contra o urânio fornece a energia necessária para que ele atinja o estado mais energético. Por causa da possibilidade do tunelamento é necessário que a energia fornecida pelos nêutrons  $E_n$ , seja quase igual a  $E_A$ . A Tabela 02 traz valores, para alguns nuclídeos, da energia  $E_A$  da barreira, e da energia  $E_n$ , transferida pelos nêutrons.

Nuclídeo Inicial	Nuclídeo formado	$E_n$ (MeV)	$E_A$ (MeV)	Fissão por Nêutrons Térmicos?
$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	6,5	5,2	Sim
$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{U}$	4,8	5,7	Não
$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	6,4	4,8	Sim
$^{243}\text{Am}$	$^{244}\text{Am}$	5,5	5,8	Não

TABELA 02: Energia de Excitação e Barreira de Potencial para Quatro Nuclídeos Pesados (HALLIDAY, 2009, p. 341)

É devido a esta barreira de potencial que o isótopo  $^{238}\text{U}$  do urânio não sofre fissão ao ser atingido por um nêutron térmico. Os valores mostrados na tabela são facilmente calculados pela equação (2) de Einstein. Considerando, por exemplo, a absorção de um nêutron (massa = 1,008665 u) pelo  $^{235}\text{U}$  (massa = 235,043922 u), formando o  $^{236}\text{U}$  (massa = 236,045562 u), temos a diferença entre as massas antes e após a absorção correspondendo a uma redução de 0,007025 u. Multiplicando este valor por  $c^2$  para converter a massa em energia, obtemos  $E_n = 6,5$  MeV, conforme aparece na Tabela 02.

Analisando os dados da Tabela 02, vemos que os nuclídeos que apresentam fissão correspondem aos que foram utilizados nas bombas nucleares que encerraram a II Guerra Mundial – a primeira bomba, lançada em Hiroshima, continha cerca de 60 kg de urânio, equivalendo a 12500 toneladas de TNT, e a segunda bomba, lançada em Nagasaki, continha cerca de 8 kg de plutônio, equivalendo a 22000 toneladas de TNT – enquanto que os nuclídeos que não sofrem a fissão emitem radiação gama para eliminar o excesso de energia dado pelo nêutron. Para fissioná-los pelo mesmo método é necessário que o nêutron seja mais energético que um nêutron térmico.

## REFERÊNCIAS

AQUINO, Kátia Aparecida da Silva. *Radioatividade e meio ambiente: os átomos instáveis da natureza.* / Kátia Aparecida da Silva Aquino, Fabiana da Silva Aquino – São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2012. 144p. – (Coleção Química no Cotidiano, v. 8)

- BASDEVANT, J.-L., RICH, J., SPIRO, M. *Fundamentals in Nuclear Physics – From Nuclear Structure to Cosmology*. Springer Verlag, New York, 2005.
- BASSALO, José Maria Filardo. Nascimentos da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 21, no. 2, Junho, 1999.
- BRAYNER, Carlos; SILVA FILHO, Elias; HAZIN, Clovis. *FUNDAMENTOS DE FÍSICA ATÔMICA E NUCLEAR*. Departamento de Energia Nuclear – UFPE, Abril/2003.
- FEYNMAN, Richard Phillips. *Física em 12 lições* / Richard P. Feynman; tradução Ivo Korytowski. – Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.
- HALLIDAY, David; RESNICK; WALKER, Jearl. *Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna*. 8ª edição. Tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. – Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- KRANE, Kenneth S. *Modern physics*. 3rd ed. JOHN WILEY & SONS, INC. 2012.
- MARTIN, Brian. R. *Nuclear and Particle Physics*. John Wiley & Sons, Ltd. 2006.
- OLIVEIRA, Ivan S. *Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- PERUZZO, Jucimar. *Física e Energia Nuclear*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012.
- VIEIRA, Cássio Leite. *História da Física - Artigos, ensaios e resenhas*. 1. ed. Rio de Janeiro: CBPF, 2015. v. 1.
- VIEIRA, Cássio Leite. *Um mundo inteiramente novo se revelou: uma história técnica das emulsões nucleares*. São Paulo: Editora Livraria da Física: CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas, 2012. – (Coleção tópicos em física)

### CAPÍTULO 3

## BOMBA NUCLEAR



A virada do século XIX para o século XX trouxe importantes contribuições para a Física que impulsionaram o desenvolvimento tecnológico e científico bem como deixaram marcas na sociedade e na natureza que jamais foram esquecidas. A descoberta dos raios X pelo físico alemão Wilhelm C. Röntgen, em 1895 e da radioatividade pelo físico Antoine Henri Becquerel em 1896 deu início a uma série de descobertas que modificaram nossas vidas. No início das pesquisas com materiais radioativos o público menos esclarecido acreditava que havia poderes curativos e milagrosos na radioatividade e passaram a usar de forma indiscriminada, gerando problemas de saúde que variaram de queimaduras a alguns tipos de câncer. Com a análise mais detalhada da ciência, a radioatividade passou a ser respeitada e seu uso foi controlado.

Porém o entendimento sobre os perigos da radioatividade trouxe consigo a possibilidade de utilizar a energia liberada na fissão de um elemento químico para a construção de armamentos. No início do século XX apenas a fissão natural era conhecida e ocorria quando um átomo instável se dividia originando elementos mais leves (menor massa atômica) e liberando energia durante o processo. Contudo, no Cavendish Laboratory, em Cambridge, durante o ano de 1931, o átomo foi dividido pela primeira vez através de uma técnica de bombardeamento do núcleo com prótons. Ernest Walton e John Cockcroft haviam produzido a

primeira fissão artificial, abrindo caminho para que em 1934 o casal Joliot-Curie conseguisse produzir a radioatividade artificial através do bombardeamento de núcleos com partículas alfa. No mesmo ano Enrico Fermi fez um trabalho semelhante, porém utilizando nêutrons, mas não conseguiu compreender os resultados de seu experimento. Somente em 1938 que os cientistas alemães Otto Hahn e Fritz Strassman compreenderam que o urânio ao ser bombardeado por nêutrons estaria se dividindo em dois átomos mais leves e liberando nêutrons neste processo, juntamente com energia e outras partículas, como afirma Barroso (2009, p. 15-16):

A fissão é causada principalmente por nêutrons, que, por serem desprovidos de carga elétrica, penetram facilmente no núcleo atômico dos elementos, provocando perturbações na sua estrutura interna. A absorção de um nêutron pelo núcleo de um elemento físsil pode levá-lo a um complicado processo de oscilação ou vibração, até desestabilizá-lo completamente, culminando na sua separação nos dois núcleos de massas intermediárias, denominados de *fragmentos da fissão*. Estes carregam, em forma de energia cinética, 80% da energia liberada; os restantes 20% são distribuídos pela emissão de raios  $\gamma$  (4%), nêutrons (3%) e neutrinos (5%), mais uma parcela posterior de 8% devida ao decaimento beta dos produtos da fissão e às reações causadas pela captura não físsil de nêutrons.

Em 1939 a física austríaca Lise Meitner, juntamente com seu sobrinho Otto Frisch que trabalhava com Bohr na Dinamarca, calcularam e explicaram - com base na equação de energia de Einstein – a energia liberada durante a fissão do urânio.

Devido à liberação de nêutrons no processo da fissão, logo se começou a pensar se estas partículas poderiam servir para bombardear outros átomos e criar novas fissões, desenvolvendo uma reação em cadeia. Foi o físico italiano Enrico Fermi, juntamente com sua equipe, que conseguiu produzir a primeira reação em cadeia através de um aparato que chamaram de pilha nuclear, a qual, de acordo com Peruzzo (2012, p. 136), “era formada por 40 t de U natural (maior parte sob a forma de  $UO_2$ , 15% de U metálico e um pouco de  $U_3O_8$ ), 393 t de grafite como moderador e 92 t como refletor de nêutrons, além de todo um conjunto de barras de controle e dispositivos de segurança”. Mas muitos anos de pesquisas e testes foram necessários para se conseguir controlar a reação em cadeia e nem todos estavam certos de que a conseguiria, como pode ser visto na conversa entre Enrico Fermi, Leo Szilard e Isador Isaac Rabi, em 1939:

Eu [Szilard] disse pra ele: “Você falou com Fermi?” Rabi respondeu, “Sim, eu falei.” Eu perguntei, “O que Fermi disse?” Rabi respondeu, “Fermi disse

‘Besteira!’” Então eu perguntei, “Por que ele disse ‘Besteira!’?” e Rabi respondeu, “Bem, eu não sei, mas ele está aqui e podemos perguntar a ele”. Então fomos ao escritório de Fermi e Rabi falou para ele, “Olhe, Fermi, eu falei para você o que Szilard pensou e você disse ‘Besteira!’ e Szilard quer saber por que você disse isso”. Fermi então respondeu, “Bem... há uma possibilidade remota de nêutrons serem emitidos na fissão do urânio e então pode acontecer uma reação em cadeia.” Rabi perguntou, “o que você quer dizer com ‘possibilidade remota’?” e Fermi respondeu, “Dez por cento.” Rabi disse, “Dez por cento não é uma possibilidade remota se significa que nós podemos morrer. Se eu tivesse pneumonia e o médico me dissesse que há uma possibilidade remota de eu morrer e ela é de dez por cento, eu ficaria preocupado com isso.” (RHODES, 2012, p. 280, tradução livre)

As conclusões a que se chegaram sobre a reação em cadeia foram: caso ela possa ser controlada, mantendo-se constante o nível de fissões, a energia liberada é utilizada, por exemplo, na geração de energia elétrica; quando a quantidade de fissões cresce rápida e descontroladamente libera-se muita energia e ocorre uma explosão, como no caso das bombas nucleares. Os reatores nucleares foram então criados combinando materiais físséis e não físséis para balancear a emissão e absorção de nêutrons – estado crítico. Nas bombas atômicas a taxa de produção de nêutrons é superior ao da perda – absorção ou fuga do meio no qual ocorrem as reações – criando um estado supercrítico. Se um átomo de material físsil liberar 3 nêutrons, como o  $^{235}\text{U}$  por exemplo (Figura 01), e estes derem origem a novas fissões, teremos uma reação em cadeia em que o número de fissões triplica a cada reação.

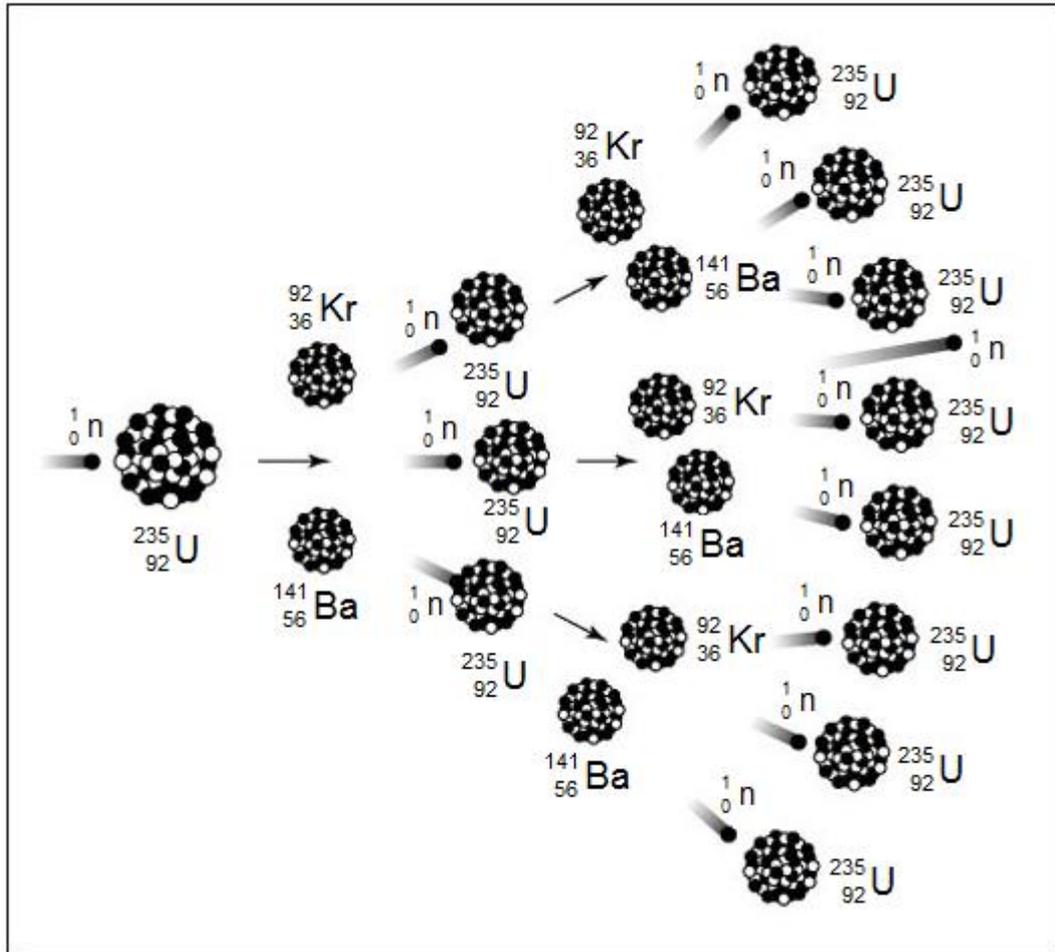


Figura 01: Reação em cadeia do  $^{235}\text{U}$ . (PERUZZO, 2012, p. 137)

Os materiais físséis são aqueles que possuem alta probabilidade de serem fissionados ao absorver nêutrons e as bombas nucleares lançadas no Japão em 1945 os utilizavam. A Little Boy, bomba lançada em 06 de agosto sobre a cidade de Hiroshima, continha urânio e a Fat Man, lançada em 09 de agosto sobre Nagasaki, continha plutônio.

Dos isótopos físséis, o  $^{235}\text{U}$  é o único que é encontrado na natureza, mas sua concentração é de apenas 0,7%, sendo necessário empregar alguma técnica de enriquecimento e é justamente por isso que o urânio não sofre reações em cadeia na natureza de modo espontâneo. O  $^{238}\text{U}$  é o isótopo do urânio encontrado em maior quantidade, mas ao absorver nêutrons ele não sofre fissão, pois não é instável. Outro isótopo físsil é o  $^{239}\text{Pu}$  que é produzido artificialmente nos reatores nucleares quando um núcleo de  $^{238}\text{U}$  absorve um nêutron e dá origem a um núcleo de  $^{239}\text{U}$ , o qual é radioativo e possui tempo de decaimento de 24 minutos. Após emitir uma partícula beta ( $\beta^{-1}$ ) este núcleo se transforma em neptúnio ( $^{239}\text{Np}$ ) que também é radioativo e possui meia vida de 2,3 dias. Após emissão de uma partícula  $\beta^{-1}$  o neptúnio se transforma em plutônio ( $^{239}\text{Pu}$ ), com meia-vida de 24000 anos.

Independente do elemento físsil utilizado é necessário que haja uma quantidade mínima de tal material para que ocorra a reação em cadeia. Esta quantidade de matéria é chamada de massa crítica (cerca de 48 kg para o  $^{235}\text{U}$  e 10 kg para o  $^{239}\text{Pu}$ ) e se deve ao espaçamento entre os núcleos dos elementos. Se a massa for subcrítica, um nêutron ejetado de um processo de fissão poderá escapar pela superfície do material antes que possa encontrar outro núcleo e a reação irá parar. Se a massa for supercrítica, a reação certamente irá continuar, pois haverá maiores chances de encontrar outro núcleo físsil.

Em abril de 1939 houve um debate sobre a possibilidade da fissão nuclear em Washington e o The New York Times publicou uma síntese da opinião dos cientistas nos EUA:

Os temperamentos e as temperaturas aumentaram visivelmente hoje entre os membros da Sociedade Americana de Físicos enquanto eles fechavam o encontro de primavera com argumentos sobre a possibilidade de algum cientista explodir um pedaço considerável da Terra com um pouquinho de urânio, o elemento que produz rádio. Dr. Niels Bohr de Copenhague, um colega do Dr. Albert Einstein do Instituto de Estudos Avançados, Princeton, N. J., declarou que o bombardeamento de uma pequena amostra do isótopo puro U235 do urânio com nêutrons lentos poderia começar uma “reação em cadeia” ou uma explosão atômica suficientemente grande para explodir um laboratório e a área ao redor por muitas milhas.

Muitos físicos declararam, entretanto, que seria difícil, se não impossível, separar o isótopo 235 do mais abundante isótopo 238. O isótopo 235 é apenas 1 por cento do elemento urânio.

Dr. L. Onsager da Universidade de Yale descreveu, no entanto, um novo aparelho no qual, de acordo com seus cálculos, os isótopos dos elementos podem ser separados na forma de gás em tubos que são esfriados de um lado e aquecidos a altas temperaturas do outro.

Outros físicos argumentaram que o processo deveria ser provavelmente caro e que a produção do isótopo 235 seria infinitamente pequena. Apesar disso, eles apontaram que, se o processo de separação do Dr. Onsager funcionasse, a criação de uma explosão nuclear que devastasse uma grande área como a cidade de Nova York seria relativamente fácil. Uma única partícula de nêutron, colidindo contra o núcleo do átomo de urânio, eles disseram, seria suficiente para começar uma reação em cadeia de milhões de outros átomos. (RHODES, 2012, p. 297, tradução livre)

Ainda no ano de 1939 a Alemanha inicia seu projeto de construção da bomba atômica tendo como cientista responsável Werner Heisenberg. O temor gerado por esta notícia leva alguns cientistas a uma mobilização a fim de informar ao presidente dos EUA sobre a situação e dar início ao projeto da bomba norte americana que em 1941 recebeu o nome de Projeto Manhattan. A falta de recursos destinados inicialmente às pesquisas nesta área desapareceu quando os japoneses atacaram uma base militar norte americana em Pearl Harbour e os EUA

entraram na guerra, que já havia se iniciado desde que a Alemanha invadira a Polônia em setembro de 1939 e a França juntamente com a Inglaterra declararam guerra à Alemanha.

O Projeto Manhattan tinha intenção de chegar em 1945 com a construção de uma bomba nuclear e contou com o apoio do Canadá e da Inglaterra. Devido ao empenho de centenas de físicos – vários deles ganhadores de Prêmio Nobel – e mais de 2.000 pesquisadores e técnicos, em 1945 os EUA contavam com três bombas atômicas: uma de urânio, com massa de 4,3 toneladas, e outras duas de plutônio. Como os cientistas conseguiram criar mais  $^{239}\text{Pu}$  do que enriquecer o  $^{235}\text{U}$ , foi utilizada uma parte do plutônio para uma explosão a nível de teste e a outra foi lançada sobre o Japão.

Para detonar a bomba era necessário que houvesse uma massa crítica e que algum átomo físsil fosse bombardeado com um nêutron para dar início à reação e era neste ponto que havia um perigo enorme, como relata Barroso (2009, p. 21):

Como existe o problema da pré-ignição, que é a possibilidade a reação em cadeia iniciar-se prematuramente, por efeito da presença inevitável e aleatória de nêutrons no interior da massa físsil, durante sua montagem supercrítica, esta deve ocorrer com a maior rapidez possível, a fim de que a ignição ocorra somente em pontos de criticalidade próxima à máxima criticalidade que se pretende inserir.

Inicialmente o mecanismo pensado para juntar as duas quantidades de massas subcríticas de urânio era conhecido como detonador de “revólver” e a bomba que o usou foi chamada de *Little Boy* (Figura 02). Contudo, para que a ignição se dê no momento certo era necessário, segundo os cálculos dos cientistas em Los Alamos, que a bala de  $^{235}\text{U}$  fosse disparada com velocidade de 1000 m/s e nenhuma arma militar tinha essa capacidade. Para contornar tal problema, os cientistas pensaram em implodir o urânio para que ele aumentasse sua densidade e alcançasse a massa crítica e então foram inseridos explosivos químicos para efetuar uma explosão precisa e controlada que promovesse o início da reação (Figura 03).

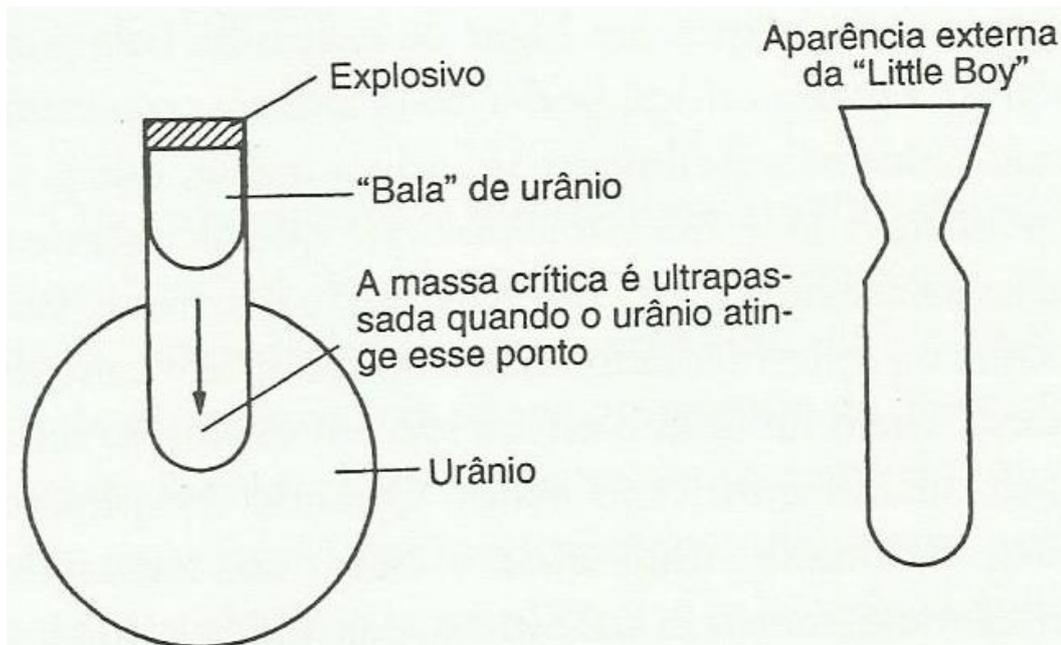


Figura 02: Mecanismo do detonador de “revólver” utilizando uma bala de urânio-235 no interior da Little Boy. (STRATHERN, 1998, p. 55)

Mesmo a alternativa de implosão não foi totalmente eficaz quando se colocou em prática. Uma equipe liderada por Seth Neddermeyer, membro do grupo de artilharia que levou a ideia para Oppenheimer, foram para o deserto próximo a Los Alamos e geraram explosões durante todo o verão de 1943 tentando causar uma explosão uniforme no cano que viria a carregar o urânio. Porém o cano implodido sempre ficava retorcido indicando que a força que causava a implosão não havia sido uniforme.

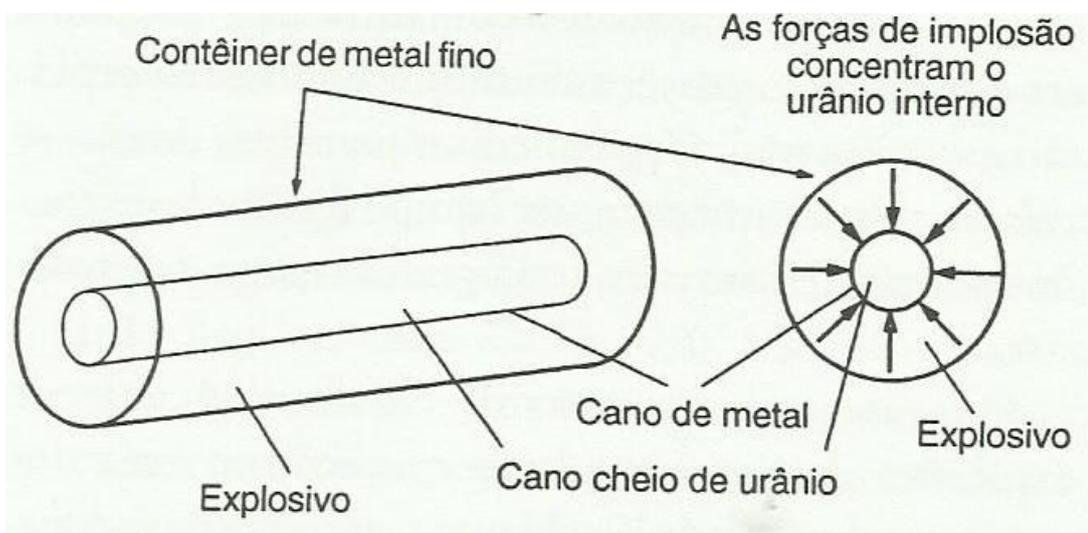


Figura 03: Mecanismo para implodir o urânio causando aumento de sua densidade para atingir a massa crítica. (STRATHERN, 1998, p. 57)

Paralelamente às tentativas de Neddermeyer os cientistas na usina de Oak Ridge tentavam enriquecer o urânio, mas enfrentavam grandes dificuldades com o processo de difusão empregado devido ao alto poder corrosivo do gás de fluoreto de urânio que estavam produzindo. Graças à descoberta de Enrico Fermi, que ao produzir a primeira reação em cadeia controlada percebeu o surgimento do isótopo radioativo do plutônio ( $^{239}\text{P}$ ), uma nova opção surgia para a criação da bomba atômica, pois este elemento era produzido nos reatores nucleares.

Apesar da vantagem de possuir menor massa crítica do que o urânio, o plutônio possui alta taxa de emissão de partículas alfa e o manuseio descuidado deste material pode levar à contaminação de várias pessoas pelo material radioativo. Para este material a alternativa de implosão parecia ser mais útil e com resultados mais favoráveis do que com o urânio e então uma alteração foi feita na ideia de Neddermeyer – que a esta altura após várias explosões infrutíferas estava afastado dos testes – usariam o material nuclear em uma esfera carregada de explosivos (Figura 04).

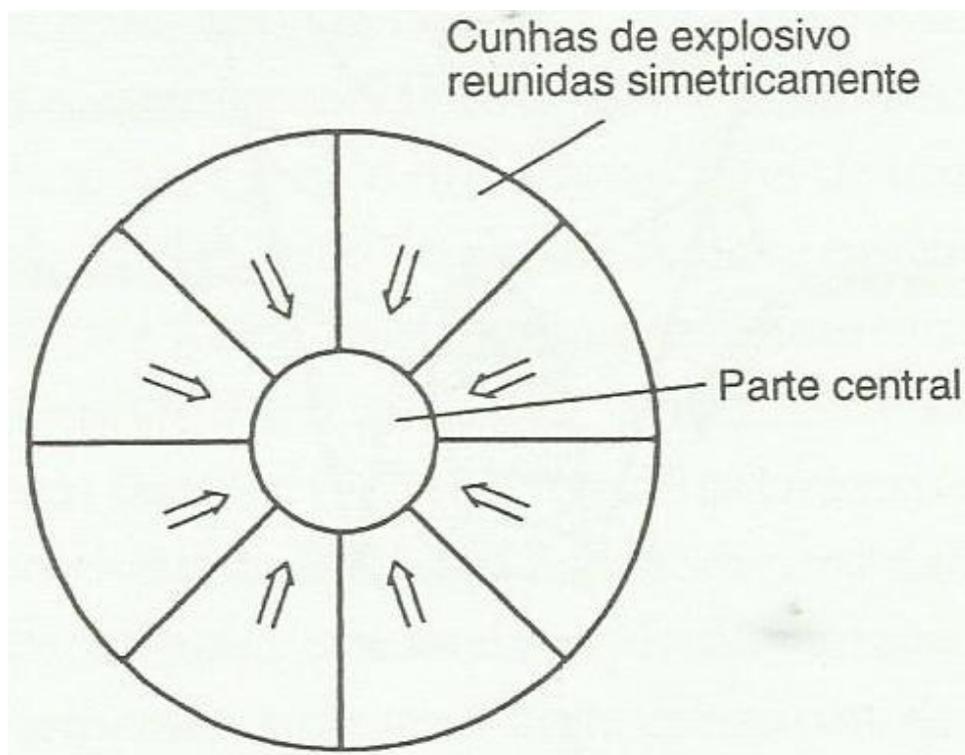


Figura 04: Elemento radioativo organizado em formato esférico e rodeado de explosivos para produzir uma detonação uniforme. (STRATHERN, 1998, p. 67)

Os problemas gerados para entender como se daria a explosão do material nuclear nesta geometria se arrastaram por algum tempo e exigiam dos brilhantes cientistas as mais variadas hipóteses para se compreender o fenômeno. Segundo Strathern (1998, p. 65-66):

Mas como seria o explosivo reunido de modo a assegurar a detonação uniforme? Excelentes físicos jovens como Feynman, e velhos mestres do calibre do grande von Neumann, transformavam-se em computadores na tentativa de conseguir as respostas. Qual a matemática que descrevia os acontecimentos? Qual a fórmula que permanecia escondida naquele emaranhado de números?

[...] Ambos haviam percebido que, quando uma onda de choque passava através do material, deixava em sua esteira certas ondas de pressão que de algum modo não podiam ser previstas. Feynman computou isso como erro em seus cálculos, mas von Neumann continuava convencido de que essa hipótese não estava correta. Entre os dois, em conversas informais, elaboravam os primeiros esboços da teoria do caos.

Com a discussão sobre as ondas de choque os cientistas chegaram à conclusão que deveriam utilizar explosivos rápidos e lentos misturados a fim de concentrar as ondas de choque na superfície do material e espalhar o impacto de modo uniforme sobre o centro curvado. Com esta configuração, projetaram a bomba de plutônio chamada *Fat Man*.

Devido à quantidade de plutônio produzido nas usinas foi possível criar duas bombas com este material radioativo e uma delas foi usada em um teste para se saber o poder de uma explosão atômica. Às 5h30min da manhã do dia 16 de julho de 1945 teve início a Era Nuclear com a detonação de *Trinity* que evaporou a torre de 300 metros de altura na qual foi colocada e transformou a areia do deserto em vidro, num raio de 700 metros do ponto zero. A nuvem de fumaça formou o cogumelo que subiu por 12 km e os cálculos mostraram que a explosão equivalera a 20.000 toneladas de TNT (20 kT), superando a previsão de 5.000 toneladas (5 kT) prevista por Szilard e aceita de modo geral pelos demais cientistas.

A equipe de cientistas liderada por Oppenheimer havia alcançado seu objetivo: os Estados Unidos havia produzido armas nucleares de potência nunca antes vista, mas a preocupação com seu uso gerava desconforto em vários deles.

O moral da equipe de gênios caía vertiginosamente nos últimos dias do Projeto Manhattan. O ânimo já vinha despencando desde a morte do presidente Franklin Roosevelt, em 12 de abril de 1945, com quem os cientistas haviam concordado em trabalhar. Eles não se entenderam bem com o novo presidente, o vice de Roosevelt, Harry Truman. Em seguida, com a rendição dos alemães no dia 7 de maio de 1945, a tensão aumentou ainda mais. A derrota nazista, que o resto do mundo recebeu como uma boa notícia, virou fator de preocupação dentro do Projeto Manhattan. O que é

fácil de explicar: foi contra Hitler que eles tinham se unido e, com o ditador nazista fora do conflito, desapareciam as justificativas para a construção de uma arma tão arrasadora. E ainda faltava um mês para o teste de Alamogordo. Foi então que, para tornar tudo ainda mais torturante, às vésperas do teste, veio a informação de que o governo americano estudava a hipótese de empregar a nova arma contra o Japão.

Era o início do pesadelo. Até ali, os cientistas alimentavam a ilusão de que o poder nuclear jamais seria de fato empregado. Na pior das hipóteses, aceitariam lançá-lo contra os nazistas. Truman vacilou entre argumentos contra e a favor. Por fim, decidiu-se. Era o final de julho. (CHIARETTI e DIEGUEZ, 1995)

O poder de destruição de uma arma nuclear já tinha sido calculado quando autorizou-se seu uso sobre o Japão. Os cientistas estimaram que o mecanismo aqueceria imediatamente o ar ao redor e formaria uma esfera com temperatura de cerca de 1.000.000 de graus com raio de aproximadamente 30 pés. Após um centésimo de segundo a esfera iria se expandir até cerca de 4.000 pés de raio e esfriar para 15.000 graus. Foi aconselhado que o piloto do avião se afastasse o mais rápido possível para não ser atingido pela radiação e que não olhasse para a explosão, pois seria tão brilhante quanto o Sol e o deixaria cego. Com a velocidade alcançada pelo avião era previsto que este conseguisse se afastar 7 milhas do local da explosão e a onda de choque que o atingisse não causaria danos. Quanto à radiação, concluíram que a altitude do avião seria cerca de 4 vezes a distância de segurança dos efeitos dos nêutrons e que o material radioativo deixaria a vizinhança da explosão inacessível por um considerável tempo, caso esta ocorra dentro de 400 pés da superfície. Em um raio de 100 km este material radioativo poderia cair sobre a terra e ser mortífero.

As bombas nucleares de urânio (Figura 05) e de plutônio (Figura 06) foram lançadas sobre o Japão nos dias 06 e 09 de agosto, respectivamente, matando mais de 220.000 pessoas e deixando um trauma na humanidade que perdura até os dias de hoje.



Figura 05: Estrutura da Little Boy, a bomba de urânio lançada sobre Hiroshima.

(<http://arte.folha.uol.com.br/mundo/2015/08/03/corrida-bomba-atmica/?w=620&h=600>)

Os efeitos de uma bomba nuclear são descritos por Peruzzo (2012, p. 270):

- Uma forte onda de choque que destrói tudo num raio próximo, enquanto vai se expandindo. Ela propaga-se com velocidade supersônica e contém 50% da energia total gerada pela explosão.
- Uma radiação térmica intensa, que contém cerca de 35% da energia total, que queima tudo o que estiver perto, como casas, animais, seres humanos e etc. Uma pessoa que esteja a 500 m do local da explosão vê uma luz cuja intensidade é equivalente a 600 sóis, provocando cegueira instantaneamente.
- Radiação nuclear imediata e radiação nuclear residual, devido a contaminação local que tem longa duração. Contém 15% da energia total, a maior parte constituída de raios X. No momento da explosão é também produzido um pulso eletromagnético intenso que danifica redes elétricas, aparelhos eletrônicos, etc.

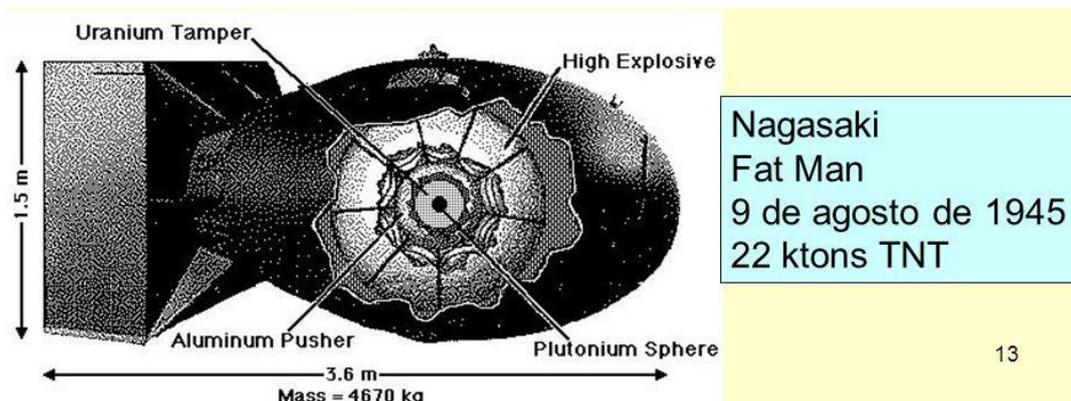


Figura 06: Estrutura da Fat Man, bomba de plutônio lançada sobre Nagasaki.

([http://images.slideplayer.com.br/4/1575614/slides/slide\\_13.jpg](http://images.slideplayer.com.br/4/1575614/slides/slide_13.jpg))

A bomba de urânio, *Little Boy*, pesava 4,3 toneladas e foi lançada do avião Enola Gay, pilotado pelo oficial Paul Tibbets, sobre a cidade de Hiroshima às 8h15min do dia 06 de agosto de 1945. A explosão ocorreu antes que a bomba alcançasse o solo, a cerca de 600 m de altitude, e tinha potência de aproximadamente 15.000 toneladas de TNT (15 kT). No centro da explosão, estima-se que a temperatura alcançou 5.500.000 °C, sublimando instantaneamente as pessoas e matando a todos num raio de 2000 m. As pessoas que não morreram queimadas sofreram devido à exposição aos altos níveis de radiação, tendo morrido cerca de 140.000 pessoas.

É interessante perceber que mesmo com o teste feito em julho com uma bomba de plutônio a real capacidade de uma bomba nuclear atingindo um alvo povoado era desconhecido, como pode ser visto em uma conferência por teletipo entre os generais Groves, que estava em Washington, e Curtis Le May, que estava na base aeronaval dos EUA em Guam, uma pequena ilha no Oceano Pacífico, em 8 de agosto de 1945, o qual dava informações técnicas para Groves sobre o impacto da bomba:

Groves: (O general) Farrell não tem idéia de como as fotos podem ser tomadas a partir do ponto de vista das colunas de fumaça? Eu pensava que a coluna de fumaça desapareceria da área atacada imediatamente. Dentro de uma hora ou duas.

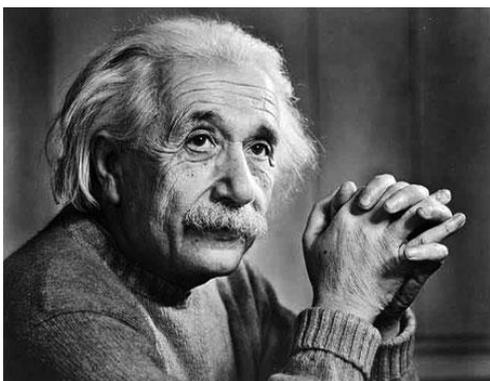
Le May: As equipes de F-13 viram vários incêndios perto da área das docas 4 horas após a bomba explodir. Suas magnitudes não puderam ser determinadas por causa da densidade da nuvem de fumaça. (GROVES para LE MAY, 1945)

Em 09 de agosto de 1945 a bomba de plutônio, *Fat Man*, pesando 4,6 t, foi lançada sobre a cidade de Nagasaki. Apesar do terreno montanhoso ter diminuído o desastre, 40.000 pessoas

morreram instantaneamente devido à explosão da bomba de potência de 22 kT e o número de mortos ultrapassou 75.000 pessoas.

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, quando os japoneses se renderam após a destruição causada pelas bombas, constatou-se que o Programa Nuclear Alemão não havia se desenvolvido, como acreditavam os americanos. Apesar de possuírem o conhecimento para a criação da bomba, os nazistas perceberam que levaria tempo e recursos até que conseguissem e abandonaram o projeto ainda no início, não tendo desenvolvido sequer o processo de reação em cadeia. Outro fator preponderante para a não realização deste projeto foi a fuga de vários cientistas, por conta da política alemã, e a crença de que se eles não conseguiriam desenvolver a bomba, outros países também não a fariam. Este pensamento errado surgiu devido a erros de cálculos, como os que apontavam a necessidade de toneladas de urânio enriquecido para a massa crítica necessária à explosão.

- Albert Einstein



O físico alemão Albert Einstein publicou em 1905 em seu *anos mirabilis* um conjunto de ideias revolucionárias para sua época, dentre elas a sua equação mais conhecida e sempre vinculada a ele:  $E = mc^2$ , mesmo sem ter como comprová-la, mostrou ao mundo, 27 anos mais tarde, que uma massa poderia dar origem a energia e que a radioatividade estava ligada a este processo devido à fissão de elementos instáveis liberarem esta energia.

A comprovação da teoria de Einstein ocorreu em grande parte sob os olhos do físico neozelandês Ernest Rutherford, o mesmo que já havia demonstrado que o átomo deveria concentrar sua massa numa região discreta e central, denominada de núcleo, enquanto os elétrons estariam em movimento em torno desta estrutura. Segundo Barata (2005):

Rutherford foi o grande mentor, em 1932, do irlandês Ernest Walton e do inglês John Cockroft que, pela primeira vez, produziram a divisão nuclear artificial completa de um núcleo atômico, através do bombardeamento de

núcleos de lítio com prótons (acelerador de partículas), originando núcleos de hélio e produzindo uma pequena quantidade de energia, como demonstrava  $E = mc^2$ .

Foi também sob a supervisão de Rutherford, em Cambridge, que o físico inglês James Chadwick, descobriu os nêutrons no núcleo do átomo. Justamente por essas partículas serem semelhantes em massa aos prótons, mas desprovidas de carga elétrica, que essa descoberta permitia que o núcleo fosse bombardeado e dividido sem haver tanta repulsão deste com os nêutrons (como no caso do bombardeio de prótons, com carga positiva), o que produzia a liberação de uma quantidade superior de energia.

A energia liberada pelo bombardeamento de nêutrons em um núcleo se deve ao aumento da massa e, conseqüentemente, da instabilidade nuclear, como já foi citado no APÊNDICE A. A energia liberada durante a fissão nuclear originada pela instabilidade e busca de uma configuração mais estável foi denominada de radioatividade.

Ao contrário do que algumas pessoas podem acreditar, Einstein não era a favor do uso de sua teoria para fins bélicos e ele não participou do projeto de criação da bomba nuclear. Sua ideia era comprovar que massa e energia eram duas representações de uma mesma coisa e que uma poderia se transformar – e não dar origem – na outra. Durante o final da II Guerra Mundial e no pós-guerra, ele se lamentava por ter tido uma participação na criação da bomba, mesmo que não tenha atuado no Projeto Manhattan.

No ano de 1939 era crescente o medo de que a Alemanha estivesse desenvolvendo uma bomba nuclear – principalmente devido aos nazistas ocuparem a Tchecoslováquia e interromperem as exportações de minério de urânio que era retirado das minas de Joachimsthal –, fato que foi confirmado após a guerra ser apenas especulação, pois os alemães não haviam desenvolvido a tecnologia necessária para tal. Einstein se mobilizou para utilizar de seu prestígio adquirido por suas descobertas para alertar o então presidente Franklin Roosevelt sobre tal perigo. Em 02 de agosto de 1939 foi escrita a seguinte carta ao presidente (CNEN, p. 21-23):

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

*“Senhor Presidente,  
Algumas pesquisas desenvolvidas recentemente por E. Fermi e L. Szilard, cujas comunicações me foram entregues em manuscritos, induziram-me a considerar que o elemento urânio possa ser transformado, num futuro próximo, em uma nova e importante fonte de energia. Alguns aspectos da situação justificam uma certa vigilância e uma rápida intervenção por parte*

*da administração estatal. Considero, portanto, que seja meu dever solicitar a V. Excia. grande atenção para os fatos e recomendações que se seguem: Nos últimos quatro meses, foi confirmada a possibilidade (graças aos trabalhos de Joliot Curie, na França e os de Fermi e Szilard, na América) que torna possível produzir, em uma grande massa de urânio, uma "reação nuclear em cadeia" capaz de gerar grande quantidade de energia e numerosos elementos com características semelhantes ao raio. Atualmente, temos quase que certeza que poderemos chegar a estes resultados num futuro imediato.*

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

*Os Estados Unidos dispõem de uma quantidade pequena de minérios com baixo teor de urânio. Encontramos bons minérios de urânio no Canadá e na Tchecoslováquia, sendo que o país que possui as melhores minas de urânio é o Congo Belga.*

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

*a) manter o governo informado dos desenvolvimentos recentes neste campo e formular recomendações através de intervenções do Estado, para assegurar aos Estados Unidos o suprimento necessário de material uranífero;*

*b) acelerar o trabalho no campo experimental que se desenvolve atualmente nos laboratórios das Universidades de maneira limitada, fornecendo mais financiamento, ou caso seja necessário, mantendo contato com empresas privadas dispostas a colaborar com esta causa, e procurando a participação de laboratórios industriais que disponham de aparelhagem necessária.*

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

*Cordialmente,  
Albert Einstein”*

Esta carta foi escrita para informar o governo americano da descoberta feita simultaneamente por dois grupos de cientistas que estavam pesquisando sobre a emissão de nêutrons na fissão do urânio: pelo canadense Walter Zinn juntamente com o húngaro Leo Szilard e pelo italiano Enrico Fermi – que havia se mudado recentemente para os EUA, fugindo do regime fascista de Mussolini – tendo como colaboradores H. L. Anderson e H. B. Haustein. Após ambos os grupos publicarem suas descobertas, Szilard pediu que Alexander Sachs, um amigo do presidente, mediasse a comunicação com o presidente Roosevelt.

Sachs, que havia levado a carta assinada por Einstein – porém escrita por Szilard como o próprio Einstein afirmou e recriou o momento desta ação após a guerra, retratando na Figura 07 – para o presidente, consegue uma audiência para discutir seu conteúdo quase dois meses após sua entrega, em 11 de outubro. Roosevelt decidiu então criar um grupo – a "Comissão do Urânio" – para cuidar dos assuntos sugeridos na carta e nomeou o Dr. Lyman J. Briggs, que era Diretor do "Bureau of Standards" para presidente desta comissão. Juntamente com Briggs, alguns militares também fizeram parte deste grupo: o Almirante Hoover e o Coronel Adamson. Em seguida se juntaram alguns cientistas, dentre os quais, Fermi e Szilard.

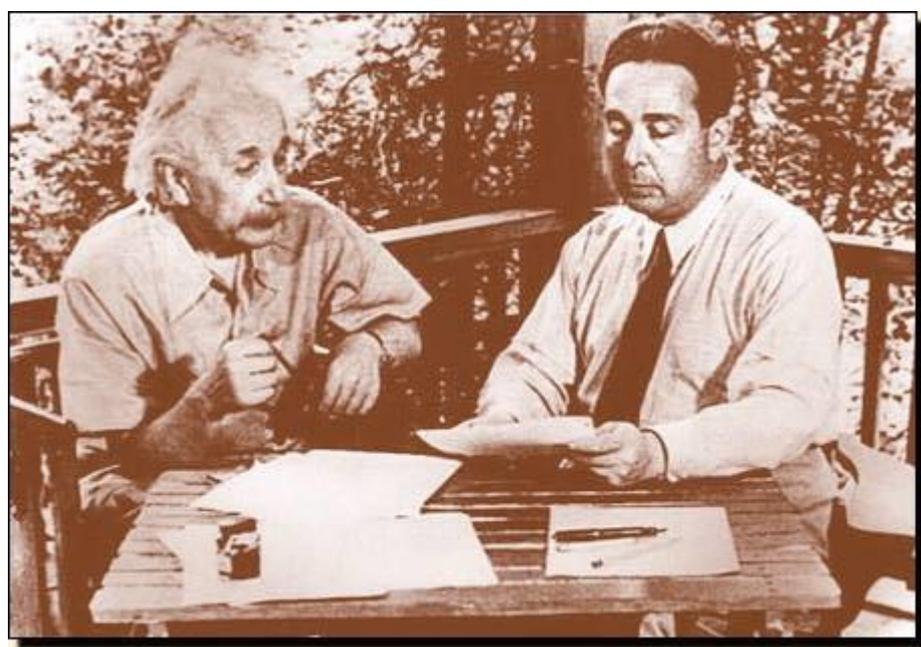


Figura 07: Reconstrução feita após a guerra do momento em que Einstein assinou a carta escrita por Szilard para enviar ao presidente Roosevelt. (<https://www.aip.org/history/exhibits/einstein/ae44.htm>)

"Because of the danger that Hitler might be the first to have the bomb, I signed a letter to the President which had been drafted by Szilard. Had I known that the fear was not justified, I would not have participated in opening this Pandora's box, nor would Szilard. For my distrust of governments was not limited to Germany."  
(<https://www.aip.org/history/exhibits/einstein/ae44.htm>)

Aparentemente o presidente Roosevelt não demonstrou tanta preocupação ou interesse na história da bomba, pois destinou poucos recursos para sua criação. De acordo com Strathern (1998, p. 43), *“No começo do Projeto Manhattan, o governo designou uma quantia preliminar de 6000 dólares para o projeto. O custo final chegaria a mais de dois bilhões. (Quantia imensa, se considerarmos que muitos operários recebiam menos de três dólares por*

dia.)”. Devido à insistência de alguns cientistas, em especial de Szilard, os cientistas envolvidos puderam conversar mais sobre suas ideias e, em outubro de 1941 (quando os EUA entraram na guerra) teve início o Projeto Manhattan.

Apesar de estar efetivamente atuando no momento inicial em que alertou o presidente dos Estados Unidos sobre a ameaça alemã de desenvolver a bomba e ter sua fórmula ( $E = mc^2$ ) diretamente ligada à compreensão da energia liberada durante a fissão nuclear, Einstein não participou e não foi informado sobre o desenvolvimento da bomba atômica, como afirma Strathern (1998, p. 38):

Num procedimento irônico, mas não atípico, Einstein jamais foi informado do andamento do super-secreto Projeto Manhattan, como veio a ser conhecido. Os serviços de “inteligência” consideraram um risco muito grande permitir ao homem que os informara a respeito do perigo tomar conhecimento do que ocorria. Esse era apenas o primeiro movimento de uma tragicomédia ininterrupta que iria arruinar muitas vidas inocentes, enquanto aos verdadeiros espões era permitido conduzir suas atividades sem serem molestados.

Um biógrafo de Einstein chamado Ronald Clarck afirma que mesmo sem a intervenção do cientista o governo estado-unidense iria desenvolver a bomba, contudo demoraria mais para ser criada e não seria usada, portanto, em 1945 no Japão. Cinco meses antes de morrer, em 1954, Einstein teria escrito que cometera o maior erro de sua vida quando assinou a carta sugerindo a criação da bomba atômica, mas que houve a justificativa do temor de a Alemanha conseguir criar a bomba primeiro.

- Leo Szilard



O físico húngaro Leo Szilard foi provavelmente o primeiro cientista a compreender como funciona a reação em cadeia necessária para a produção da bomba atômica. Porém ele passou um período de seis anos (1933-1939) mantendo sua ideia em segredo por causa do regime

nazista. Quando a Alemanha invadiu a Polônia em 1939, Szilard se mudou para os EUA e resolveu incentivar o governo a desenvolver um projeto para criação de uma arma nuclear, tendo escrito a carta que Einstein assinou e foi enviada ao presidente Roosevelt em agosto de 1939.

Szilard estava insatisfeito com o modo lento que as pesquisas estavam sendo desenvolvidas em seu momento inicial, pois o general que estava a frente do desenvolvimento da bomba, Leslie Groves, havia separado os cientistas em várias cidades do país para que cada um desenvolvesse suas ideias e não houvesse vazamento de informações. Contudo, sabendo que os cientistas desenvolvem melhor suas teorias quando discutem entre si, Szilard não obedeceu às determinações de Groves, dando um impulso às pesquisas para se desenvolver o artefato.

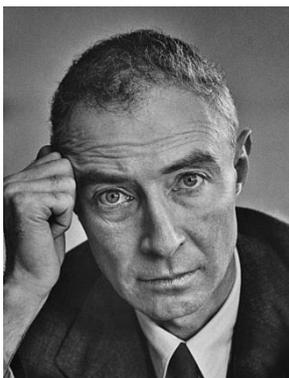
Quando a Alemanha se rendeu em 1945 Szilard foi, provavelmente, o cientista que mais pensou sobre o uso da arma que ele desejou tão fortemente que fosse criada. Já não havia o medo dos alemães terem uma bomba nuclear e o único país que ainda resistia e continuava em guerra contra os Aliados era o Japão. Assim como pensara em 1939, pediu mais uma vez que Einstein assinasse uma carta para o presidente Roosevelt alertando sobre o perigo de uma corrida armamentista nuclear caso a bomba fosse usada sem que um acordo internacional de controle destes armamentos fosse discutido com a União Soviética. Entretanto, em 12 de abril Roosevelt morreu e seu vice Harry Truman assumiu o governo – sem que ele mesmo tivesse conhecimento do secreto Projeto Manhattan durante os anos anteriores – e não se reuniu com Szilard para discutir tal proposta. Em seu lugar o então presidente mandou James Byrnes, que se tornou Secretário do Estado e discordou do ponto de vista de Szilard, pois estava preocupado com o futuro militar e estrategicamente desejava demonstrar o poder norte americano para os russos. Em julho Truman decidiu lançar as bombas sobre o Japão.

O homem que mais lutou para ver a bomba construída foi depois o que mais fez força para impedir que ela fosse usada: o físico húngaro Leo Szilard. Desde 1933, antes de qualquer outro, ele intuiu no que daria a mistura das equações de Einstein com a radioatividade. Nos dez anos seguintes, gastou tempo batendo à porta dos governos inglês e americano para convencê-los de que suas ideias não eram absurdas. Em 1939, Szilard conseguiu que Einstein, um dos gênios de maior prestígio na época, escrevesse uma carta a Roosevelt, presidente dos Estados Unidos, dizendo que a bomba era factível e que os alemães poderiam construí-la durante a guerra. Mas, depois, tentou evitar o bombardeio de Hiroshima a todo custo. Arrumou encrenca com quem foi preciso. Especialmente com o então poderosíssimo general Leslie Groves, coordenador do projeto. Derrotado, depois do ataque nuclear pediu a um padre para rezar uma missa para os mortos.

No final das contas, Szilard foi apenas ingênuo. Obcecado pelos crimes do nazismo, ele só se deu conta do demônio que havia criado quando já não havia mais como detê-lo. Porque a arma nuclear, mais do que qualquer outra obra humana, trouxe para dentro da ciência o poder do sistema de produção em escala. O projeto da bomba virou indústria: posta em movimento, começou a devorar os seus criadores. (CHIARETTI e DIEGUEZ, 1995)

Como argumento utilizado para optar pelo uso das bombas, o governo estado-unidense afirmou que muitas vidas de soldados americanos seriam tiradas caso os militares invadissem o Japão com as armas tradicionais – como pretendiam fazer em novembro daquele mesmo ano – e o uso da bomba nuclear poupou a vida destes soldados, dando um fim à guerra, em agosto. Sabe-se, porém, que além de por fim na guerra o governo dos EUA queria mostrar seu poder militar, pois já se desenhava um futuro no qual duas grandes potências se tornavam hegemônicas: os Estados Unidos e a União Soviética.

- J. Robert Oppenheimer



O projeto Manhattan foi inicialmente comandado por militares, sendo o general Leslie R. Groves, engenheiro militar responsável pela construção do pentágono, o responsável por comandar a todos. Contudo era necessário controlar as grandes mentes científicas que se concentravam para resolver os problemas científicos para a produção da bomba e J. Robert Oppenheimer (1904-1967) conhecia os avanços da física nuclear e era conhecido por inspirar as jovens mentes científicas que chegavam a Universidade da Califórnia, em Berkeley, onde dava aulas, além de conhecer vários dos brilhantes cientistas da época.

Logo no início Oppenheimer sugeriu que todo o conhecimento fosse concentrado em um único lugar e conseguiu convencer Groves, que inicialmente era contrário a esta ideia. Surgia a cidade de Los Alamos como centro do desenvolvimento nuclear, com a vantagem de ser um local isolado e a desvantagem de ter acomodações e estruturas ruins para conter gastos que deveriam ser destinados à construção da própria bomba.

Apesar de não ser um bom físico experimental, “Oppenheimer deu importante contribuição à fase inicial da mecânica quântica e publicou um dos primeiros modelos teóricos de um buraco negro” (Strathern, 1998, p. 7). Além disso, tinha grande conhecimento em áreas distintas e sabia liderar um seleto grupo de cientistas, sabendo ouvir os grandes especialistas das diversas áreas que ali se concentravam, conseguindo extrair o melhor de cada um deles e de suas discussões. Em 1939, ele demonstra sua incrível capacidade de reunir conteúdos e pensa em aplicações para a fissão nuclear, ao ser informado pelo físico estadunidense Luiz Walter Alvarez:

Eu [Alvarez] lembro de falar para Robert Oppenheimer o que nós estávamos indo procurar [pulsos de ionização da fissão] e ele disse, “Isso é impossível” e deu muitas razões teóricas sobre o porquê de a fissão não poder realmente acontecer. Quando o convidei para olhar o osciloscópio depois, quando nós vimos os grandes pulsos, eu diria que em menos de quinze minutos Robert tinha decidido que estava diante de um efeito real e... ele tinha decidido que alguns nêutrons se agitavam na reação, e que poderiam ser feitas bombas e gerar energia, tudo isso em poucos minutos... Foi fantástico ver como sua mente trabalha rapidamente, e ele chegou a conclusões corretas. (RHODES, 2012, p. 274, tradução livre)

Por estas qualidades foi capaz de conduzir os EUA ao seu objetivo e ficou conhecido como “o pai da bomba”.

Em 16 de julho de 1945 Oppenheimer e um grupo de cientistas observaram a explosão da primeira bomba nuclear da história em um abrigo feito a 9 km de distância do ponto zero, onde havia sido colocada a arma nuclear. Outros cientistas e alguns convidados VIPS assistiram tudo a partir da Base que ficava a 30 km do local da explosão. Às 5h30min da manhã Oppenheimer e todos ali presentes viram a escuridão da noite sumir devido ao intenso clarão provocado pela bomba, seguido de uma rajada de calor e após um tempo foram atingidos pelo estrondo da onda de choque, enquanto a terra estremecia. No local da explosão foi erguido um obelisco de 3,7 m de altura, em 1965 (FIGURA 08). Anos depois, em uma entrevista em 1965, Oppenheimer assumiu que naquele momento lembrara e se conscientizara das palavras da Escritura Hindu, o *Bhagavad-Gita*: “*Transformei-me na Morte, a destruidora de mundos*”.



Figura 08: Obelisco para a primeira explosão atômica com a seguinte inscrição: "Sítio Trinity, onde o primeiro dispositivo nuclear do mundo foi explodido em 16 de julho de 1945"

(<http://jornalggn.com.br/noticia/os-70-anos-da-exploracao-da-primeira-bomba-atmica>)

Apesar de alguns cientistas estarem engajados em pedir ao presidente Truman que não fizessem uso da bomba sobre o Japão, Oppenheimer se manteve em silêncio e não assinou nenhuma das petições escritas por Szilard, nas quais pretendia discutir o uso da energia nuclear sem que a arma fosse usada. Em outubro de 1945, pediu demissão do cargo de diretor do Projeto Manhattan e saiu de Los Alamos para retornar à vida acadêmica. Em 1947 passou a chefiar o Instituto de Estudos Avançados, em Princeton, onde podia trabalhar com cientistas ilustres, como Einstein e von Neumann. Como consultor do Comitê de Energia Atômica foi contra a criação da bomba de hidrogênio e passou a ser investigado pelo FBI sob a acusação de ser comunista, dado o envolvimento de seu irmão com grupos de esquerda. Como o mundo estava sob a tensão da Guerra Fria e nada se podia provar contra ele, o afastaram de cargos no

governo e cassaram seu certificado de liberação, impedindo-o que tivesse acesso a documentos oficiais. Moralmente ele ficou devastado e sua aparência começou a denunciar seu abatimento. Nove anos se passaram até que ele fosse indicado pelo presidente Kennedy ao prêmio Enrico Fermi, demonstrando assim que ainda tinha prestígio, mas continuou com seu certificado de liberação negado.

- Enrico Fermi



O físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) foi, sem dúvida, um dos cientistas mais importantes para a concretização do plano estadunidense de criar uma arma nuclear devido a seus conhecimentos em relação aos nêutrons, que haviam sido descobertos alguns anos antes da construção da bomba.

Assim como tantos outros cientistas, Fermi fugiu da Europa por conta do regime político opressor que tomava conta de seu país – o fascismo – como relata Chiaretti e Dieguez (1995):

No final de 1938, o físico italiano Enrico Fermi aproveitou uma ocasião extraordinária para escapar da ameaça de perseguição que sentia em seu país, então sob o domínio fascista. Numa quebra de sigilo sem precedentes, mas justificável naquelas circunstâncias, ele havia sido informado de antemão que ganharia o Prêmio Nobel de Física daquele ano. Então, sabendo que conseguiria uma autorização para ir a Estocolmo, na Suécia, receber a láurea, planejou secretamente não voltar mais para a Itália. Fugiu com toda a família para os Estados Unidos.

Sua decisão se deu por conta de sua esposa ser judia. Assim como o regime nazista, o fascismo italiano contribuiu com a concentração de mentes brilhantes nos EUA no momento da guerra e Fermi fez parte do Projeto Manhattan. Teve a perspicácia de manusear os nêutrons para produzir a reação em cadeia e tornar ainda maior a liberação de energia de uma massa de material radioativo. Como não era um processo simples, Fermi e seu grupo de cientistas conseguiram demonstrar a reação em cadeia pela primeira vez em dezembro de 1942, na

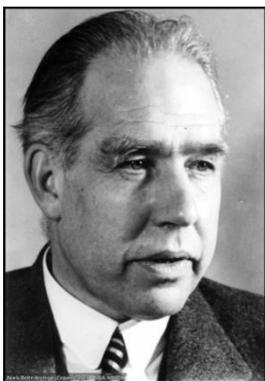
Universidade de Chicago, e a partir deste momento a construção da bomba passou a ser um problema técnico e não mais científico, pois era necessário enriquecer o urânio e conseguir montar a ogiva nuclear sem que ele explodisse antes do momento desejado.

Quando viu a primeira bomba nuclear – Trinity – explodir a 30 km da Base de onde assistia ao show, deixou propositalmente cair pedaços de papel que tinha em sua mão para mensurar a força da explosão. A partir da distância que a onda de choque arrastou os papéis Fermi, foi possível calcular que aquela bomba equivalia a 10.000 toneladas de TNT, superando os cálculos de Szilard e outros cientistas que estimavam que fosse equivalente a 5.000 toneladas de TNT. Após a explosão instrumentos de medida mensuraram o poder da bomba em 18,6 quilotons.

*“Cerca de 40 segundos após a explosão o jato de ar chegou a mim. Eu tentei estimar sua força deixando cair de aproximadamente seis pés pequenos pedaços de papel antes, durante e depois da passagem da onda de choque. Uma vez que, no momento, não havia vento, pude observar muito claramente e realmente medir o deslocamento dos pedaços de papel que estavam em processo de queda, enquanto a explosão foi passando. A mudança foi de cerca de 2,5 metros, o que, no momento, eu estimei para corresponder à explosão que seria produzida por dez mil toneladas de T.N.T.” (Fermi in RHODES, 2012, p. 674, tradução livre)*

Como participante do Interim Committee Scientific Panel, juntamente com Oppenheimer e outros cientistas – Fermi acreditava que lançar as bombas sobre o Japão salvaria vidas de militares americanos, apesar de reconhecer o perigo de prejudicar negociações internacionais que envolvessem o controle do uso de armas nucleares. Sobre este risco o Comitê sugeria que os militares investissem nas possibilidades de armas nucleares mais potentes e que fossem feitos acordos internacionais para se evitar novas guerras.

- Niels Bohr



O físico dinamarquês Niels Bohr permaneceu em Copenhague – grande centro de pesquisa – até 1943, onde havia refugiado cientistas judeus que fugiram do nazismo, bem como recebia cientistas alemães, como seu ex-aluno Heisenberg, e desenvolvia trabalhos na área de fissão nuclear. Sua posição de não deixar o instituto era vista com temor, pois os nazistas poderiam se apropriar de suas pesquisas, mesmo que ele procurasse manter seu tom pacifista. Contudo os militares nazistas organizaram um golpe contra Copenhague e o rei Cristiano X, amigo de Bohr, ordenou sua fuga e ele foi para Londres, onde foi convencido a se juntar a outros brilhantes cientistas em Los Alamos.

A presença de Bohr em Los Alamos foi encarada como um grande incentivo para os cientistas que ali estavam, inclusive isso foi percebido por Oppenheimer:

Bohr falou com desprezo de Hitler, que, com algumas centenas de tanques e aviões, tentou escravizar a Europa por um milênio. Ele disse que nada disso poderia acontecer novamente; e sua mais alta esperança que o resultado seria bom, e que o papel da objetividade, da cooperação que ele havia percebido entre os cientistas iria ser útil; tudo isso, todos nós queríamos muito acreditar. (RHODES, 2012, p. 524, tradução livre)

Após algum tempo Bohr relata a um amigo que os cientistas em Los Alamos teriam chegado à bomba sem sua ajuda.

Em 1944 tentou convencer Roosevelt e Churchill sobre a regulamentação do uso da tecnologia nuclear sem que usassem a bomba em uma cidade habitada, mas sem sucesso. Einstein fica sabendo dos esforços de Bohr e tenta ajudá-lo nesta missão e a eles se juntam o Szilard e outros cientistas, mas não obtiveram sucesso.

Acreditava que o desenvolvimento da bomba atômica deveria ser mais considerado em seu papel preventivo e que seu uso poderia influenciar politicamente o futuro do país.

- Werner Heisenberg



Werner Heisenberg era um ex-aluno de Niels Bohr, ganhador de um Prêmio Nobel e um dos poucos cientistas brilhantes que não saíram da Alemanha após o domínio nazista. Em agosto de 1939 foi nomeado diretor do principal centro de pesquisas nucleares alemão, o Instituto Kaiser Wilhelm de Berlim e chefiou o projeto nuclear alemão, mas tinha uma grande dificuldade em trabalhar com física experimental e de operar cálculos simples, apesar de ser um brilhante físico teórico – desenvolveu o Princípio da Incerteza, de grande importância para a física. Devido à rígida hierarquia mantida no meio científico, cientistas de menor posição não podiam dar soluções para problemas que os grandes cientistas se deparavam e este fator pode ter atrapalhado o plano alemão de desenvolver uma arma nuclear.

Segundo Sobrinho (2010, p. 57), “*Werner Heisenberg e outros cientistas alemães disseram que não haviam feito a bomba porque não quiseram, por não serem nazistas, por não quererem dar a bomba a Hitler.*” Um dos fatores que certamente impediu os alemães de concluir a construção da bomba foi a insistência em utilizar água pesada como moderador para conter a reação em cadeia, enquanto Fermi já havia publicado um artigo no qual afirmava que o grafite seria o moderador mais adequado. Como tentativa de provar que os cientistas alemães realmente não desejavam dar a arma para Hitler, eles se defenderam afirmando que não seguiram o que fora publicado por Fermi. Contudo também aparecem indícios de que eles não tinham o conhecimento e recursos necessários para criar a arma nuclear.

Heisenberg teve algumas oportunidades de fugir da Alemanha nazista, como fizeram inúmeros outros cientistas, mas não o fez por opção de não abandonar sua pátria e a ciência alemã, a qual já havia sofrido grandes perdas devido ao nazismo, tanto com a saída de mentes brilhantes do país quanto pela divisão criada por um grupo de físicos nazistas – dentre eles Philip Lenard, ganhador do prêmio Nobel de 1905 por perceber o efeito fotoelétrico – que criticavam aqueles que acreditavam nas teorias de Einstein, como Heisenberg e Sommerfeld. Classificavam os físicos como seguidores da “Física Ariana” ou da “Física Judaica” e dividiam os departamentos de física das instituições de ensino em física teórica e física experimental, sem que estas trocassem informações. Alguns historiadores acreditam em outra opção: ele ficou na Alemanha por acreditar que Hitler poderia vencer a guerra e deste modo ele teria muitos privilégios.

Podemos classificar então dois Heisenbergs: um nacionalista que ficou na Alemanha e não conseguiu fazer a bomba por falta de recursos, por sabotagens feitas pelos aliados – como a destruição de uma usina na qual produzia água pesada para o seu projeto –, por falta de

logística, etc., e o cientista internacional que manteve sua ideologia de não fabricar a bomba por não querer que ela fosse usada por Hitler.

Em 1941, em uma visita de Heisenberg a Bohr, na Dinamarca, que já havia sido invadida pela Alemanha, e que posteriormente deu origem a uma peça intitulada *Copenhagen*, de Michael Frayn, e mostra a visão de Heisenberg sobre o encontro. Sobre esse encontro Sobrinho (2010, p. 88) afirma:

Na versão heisenberguiana dos fatos, Heisenberg teria como objetivo primário convencer Bohr da importância de os aliados não começarem nenhum projeto nuclear visando a construção de uma bomba atômica. Heisenberg teria garantido que nem ele nem sua equipe pretendiam construir bomba alguma. Eles seriam verdadeiros espões infiltrados, dispostos a sabotar Hitler, ao não dar uma arma de destruição em massa. Ele teria, inclusive, mostrado a Bohr um desenho seu de um reator nuclear, como prova de boa vontade, ciente dos riscos que tal atitude poderia acarretar. Bohr teria entendido tudo de maneira diversa e, alarmado, teria iniciado a campanha que culminaria com o engajamento de Einstein e o início do Projeto Manhattan. A visita de Heisenberg a Bohr aconteceu em 1941, o projeto Manhattan começou em 1942.

- Vannevar Bush



Bush não foi um dos cientistas que trabalhou na bomba e nem era um físico nuclear, ele era engenheiro elétrico, inventor e principalmente um excelente administrador. Durante a Primeira Guerra Mundial atuava na detecção de submarinos. Ex-reitor da escola de engenharia do MIT, dirigiu o Instituto Carnegie e assumiu o comando da Comissão Nacional do Conselho de Aeronáutica (National Advisory Committee on Aeronautics – NACA) no final da década de 1930, entrando no mundo da política de Washington. Enquanto estava na NACA percebeu que o exército estadunidense estava cientificamente despreparado.

Durante a Segunda Guerra Mundial quase ninguém sabia de sua ligação com o Projeto Manhattan – e ainda hoje muitos desconhecem sua importância na construção da bomba.

Devido a sua preocupação com a guerra que já havia se iniciado na Europa, propôs ao presidente Roosevelt, em junho de 1940, a criação de uma organização para promover a pesquisa de tecnologia militar, alinhando a ciência, o exército e a indústria. Imediatamente foi criada a Comissão de Recursos de Defesa Nacional (National Defense Research Committee – NDRC) com Vannevar Bush como seu presidente e dentro de pouco tempo ele se tornou o principal conselheiro de Roosevelt.

Em 1941 Bush teria ouvido o professor Marcus Oliphant, um físico australiano, em uma visita aos Estados Unidos para alertar que os alemães estavam investindo recursos para conseguir controlar a reação em cadeia e que os ingleses não conseguiriam tal feito. Após confirmar a veracidade da informação sobre a Inglaterra alertou Roosevelt sobre a necessidade de desenvolver a arma nuclear antes dos nazistas e este propõe uma ação conjunta a Churchill. Visando resolver problemas de engenharia que os EUA estavam enfrentando, principalmente no Projeto Manhattan, Roosevelt transforma o NDRC no Escritório de Pesquisa Científica e Desenvolvimento (Office of Scientific Research and Development – OSRD) que acelera o desenvolvimento da bomba. Em 09 de março de 1942 Bush enviou um memorando ao presidente Roosevelt argumentando a favor da criação da bomba atômica

“A opinião atual indica que o uso com sucesso da bomba seja possível, e que isso seria muito importante e talvez determinante no esforço da guerra. É também verdade que se o inimigo alcançasse a bomba primeiro, seria uma questão extremamente séria”

“As melhores estimativas indicam que a bomba estará completa em 1944, se todo esforço for feito para tal” (Bush para Roosevelt, 1942, in LONG)

Neste mesmo memorando Bush recomendava que o projeto fosse transferido para os militares a fim de manter o projeto em segredo e recebendo financiamentos e materiais necessários ao seu desenvolvimento. Após dois dias Roosevelt responde a Bush:

“Eu penso que a coisa toda deveria ser impulsionada não apenas a despeito do desenvolvimento, mas também devido ao tempo. Essa é a essência.” (Roosevelt para Bush, 1942, in LONG)

Com a liberação do presidente, o projeto foi entregue aos militares em junho de 1942, mas Bush não se afastou dele. Em setembro daquele ano foi criada a Comissão de Política Militar, a qual ele seria o presidente, e examinaria questões sobre a bomba. O projeto

Manhattan seria dirigido pelo General Leslie Groves, mas a Comissão Política Militar supervisioná-lo-ia.

Com a proximidade do final da guerra crescia o temor de Bush sobre os problemas gerados pelo desenvolvimento da arma nuclear. Ele temia que uma relação entre os EUA e a Inglaterra deixando de lado a Rússia poderia levar esta a desenvolver uma arma nuclear e entrar em conflito com as outras duas potências. Junto com seu colega James Conant escreveu dois documentos para o secretário de guerra Henry Stimson em setembro de 1944 alertando sobre a supremacia estadunidense de possuir a bomba atômica ser passageira e logo outros países poderiam desenvolver tal tecnologia. Havia também o alerta sobre a possibilidade de uma guerra nuclear e a criação de uma bomba de fusão nuclear – a bomba de hidrogênio.

Os pedidos para a criação de uma comissão que regulamentasse o uso da energia nuclear no pós-guerra culminou com a formação da Comissão Interina, meio ano depois. Nela Bush e Conant conscientizavam os outros membros sobre suas preocupações. Contudo, após o fim da guerra não houve cooperação devido à desconfiança russa em relação ao Ocidente. Em 1949 Bush escreveu:

“O uso da bomba atômica terminou a guerra. Sem dúvida a guerra teria terminado em todo o caso, pois o Japão tinha sido levado próximo à rendição [...] Ainda assim, diante desses fatos tínhamos planejado e tinha sido colocado em prática no momento em que a bomba caiu um grande programa de invasão por terra... era claro que essa campanha poderia custar centenas de milhares de baixas em nossas tropas” (Vannevar Bush, *Modern Arms and Free Men*, pg. 91-92, <http://www.douglong.com/bush.htm>)

Sua atuação durante a guerra promoveu um crescimento no complexo industrial-militar, pois visava a comunicação entre a ciência, a indústria e o governo. Mas, o crescimento da influência militar sobre a ciência no pós-guerra o deixava desconfortável.

## REFERÊNCIAS

- BARATA, Germana. *Bomba atômica foi fecundada pela relatividade, mas nasceu de múltiplas descobertas científicas*. Disponível em <http://www.comciencia.br/reportagens/2005/03/02.shtml>
- BARROSO, Dalton Ellery Girão. *A Física dos explosivos nucleares*. 2 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009.

CHIARETTI, Marco; DIEGUEZ, Flávio. A história da bomba atômica e seu genocídio instantâneo. Revista Superinteressante. Edição 94, julho de 1995. Disponível em:

<http://super.abril.com.br/historia/ahistoriadabombaatomicaeseugenocidioinstantaneo>.

Visualizada em setembro de 2015.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. *A História da Energia Nuclear*. Apostila educativa. Disponível em

<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/historia-da-energia-nuclear.pdf>

GROVES, L. R. [Teletipo] 08 agos. 1945, Washington [para] LE MAY, Curtis; Guam.

LONG, Doug. *Vannevar Bush and the Atomic Bomb*. Disponível em <http://www.douglong.com/bush.htm>. Visualizado em 17/09/2015.

PERUZZO, Jucimar. *Física e Energia Nuclear*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2012.

RHODES, Richard. *The making of the atomic bomb*. New York: Simon & Schuster; Anv Rep edition, 2012.

SOBRINHO, Marcelo Barros. A Física e o Projeto Atômico Alemães na Segunda Guerra Mundial. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo, 2010.

STRATHERN, Paul. *Oppenheimer e a bomba atômica em 90 minutos*/ Paul Strathern; tradução Maria Helena Geordane; consultoria Carla Fonseca-Barbatti. – Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1998.

A corrida pela bomba – Little Boy, disponível em <http://arte.folha.uol.com.br/mundo/2015/08/03/corrída-bomba-atômica/?w=620&h=600>. Acessado em 18/09/2015.

Fat Man, disponível em [http://images.slideplayer.com.br/4/1575614/slides/slide\\_13.jpg](http://images.slideplayer.com.br/4/1575614/slides/slide_13.jpg). Acessado em 18/09/2015.

History. Einstein signing of the letter, disponível em <https://www.aip.org/history/exhibits/einstein/ae44.htm>. Acessado em 18/09/2015.

Os 70 anos da explosão da primeira bomba, disponível em

<http://jornalggm.com.br/noticia/os-70-anos-da-explosao-da-primeira-bomba-atômica>.

Acessado em 18/09/2015.

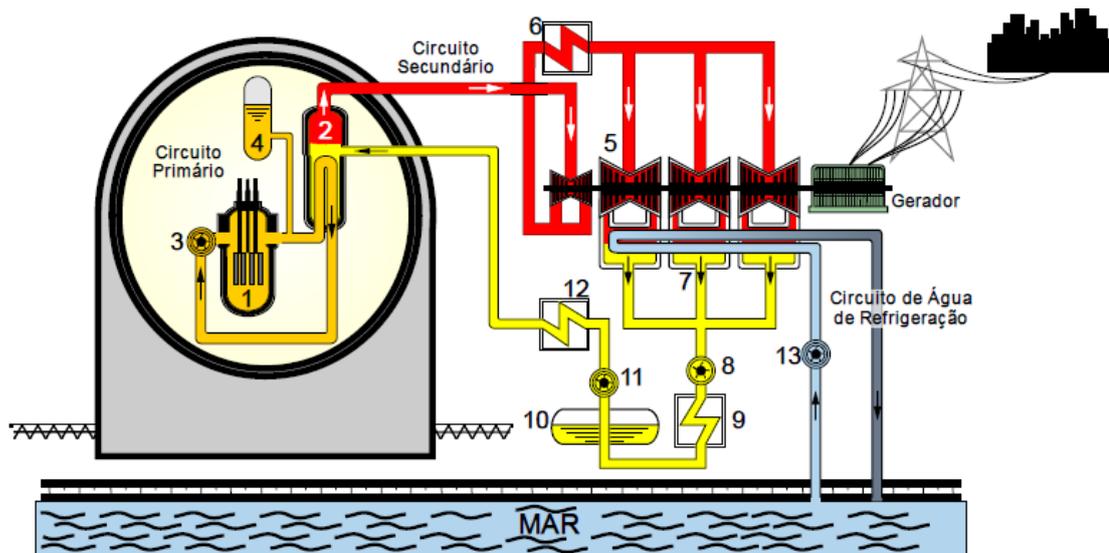
## **CAPÍTULO 4**

### **ENERGIA NUCLEAR E INDÚSTRIA**

O Brasil utiliza a energia hidroelétrica como principal meio de obter energia elétrica e no cenário de seca que enfrentamos nos últimos anos, em algumas das regiões em que se encontram nossas usinas, pode sempre surgir o pensamento de obter energia elétrica a partir de outras fontes, que não seja a água represada de um rio. Dentre tantas alternativas como energia solar, energia eólica ou energia termoelétrica, surge a opção de utilizarmos a energia nuclear.

Em nosso país existe um complexo de usinas nucleares localizada no Rio de Janeiro, as três usinas em Angra dos Reis, das quais, segundo o site da empresa responsável por sua construção e operação, a Eletrobrás Eletronuclear, Angra 1 está em funcionamento desde 1982, Angra 2 – que começou a ser desenvolvida juntamente com Angra 3 na década de 1980 – começou a gerar eletricidade em 2001 e Angra 3 tem previsão para entrar em operação em 2018, após algumas paralisações e retomadas de seu projeto nas últimas décadas.

O processo de transformação da energia nuclear em energia elétrica ocorre dentro do reator nuclear, onde os átomos de urânio sofrem a fissão nuclear e aquecem a água que passa pelo reator a altas temperaturas. Para evitar a ebulição da água, ela é mantida a altas pressões, cerca de 150 vezes maior que a pressão atmosférica, permitindo que atinja temperaturas de 320 °C sem mudar de estado físico. Esta água fica contaminada pelo material radioativo, mas para evitar riscos e outras contaminações há um circuito secundário que também contém água, mas não entra em contato com o primeiro, efetuando apenas troca de calor entre eles. Com a absorção do calor, a água do circuito secundário entra em ebulição e o vapor irá mover uma turbina que acionará o gerador elétrico, tal qual ocorre em uma usina termelétrica e por isso essa é chamada de termonuclear. Após girar a turbina um terceiro circuito contendo água do mar, e também isolado dos outros dois, resfria a água do segundo circuito para iniciar um novo ciclo. O esquema dos três circuitos é mostrado na Figura 01.



- |                                    |                                      |                                  |
|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1 Reator                           | 6 Reaquecedor / Separador de Umidade | 10 Tanque de Água de Alimentação |
| 2 Gerador de Vapor                 | 7 Condensador                        | 11 Bomba de Água de Alimentação  |
| 3 Bomba de Refrigeração do Reator  | 8 Bomba de Condensado                | 12 Preaquecedor de Alta Pressão  |
| 4 Pressurizador                    | 9 Preaquecedor de Baixa Pressão      | 13 Bomba de Água de Refrigeração |
| 5 Turbinas de Alta e Baixa Pressão |                                      |                                  |

Figura 01: Sistemas de circulação da água no reator nuclear. (CARDOSO, 2012, p. 28)

Para evitar contaminação radioativa, a estrutura do reator nuclear precisa de várias camadas de proteção além dos três sistemas de circulação de água já mencionados. Assim como a equipe de Enrico Fermi conseguiu montar uma “pilha nuclear” em 1942, provocando a primeira reação em cadeia feita em laboratório, as usinas nucleares têm dentro dos reatores pastilhas de dióxido de urânio dentro de varetas construídas com uma liga especial para reter a maior parte dos produtos gerados na fissão (Figura 02). O urânio utilizado aqui necessita ser enriquecido – tal qual o da bomba atômica, porém em menor concentração – a 3% ou 4%. Na natureza o  $^{235}\text{U}$  é encontrado numa concentração de 0,7% enquanto o  $^{238}\text{U}$  possui 99,3% da concentração deste isótopo. Como é necessário que o material seja físsil para produzir a reação em cadeia, há a necessidade de seu enriquecimento, mas não há riscos de explosões como de uma bomba atômica, pois a concentração utilizada é inferior à requerida para uma arma nuclear – cerca de 90% – não havendo possibilidade de ocorrer uma reação em cadeia com rapidez suficiente para explodir. Além disso, há mecanismos no interior dos reatores das usinas que absorvem os nêutrons emitidos durante a fissão a fim de controlar a reação e impedir a explosão.

O minério extraído é inicialmente purificado, dando origem a um sal amarelado, chamado de *yellowcake*, de  $\text{U}_3\text{O}_8$ , que é em seguida dissolvido para dar origem ao gás  $\text{UF}_6$  e então se aumenta a concentração do  $^{235}\text{U}$  até o valor desejado. Para se obter um quilograma do combustível para as usinas são usados aproximadamente oito quilos de *yellowcake*.

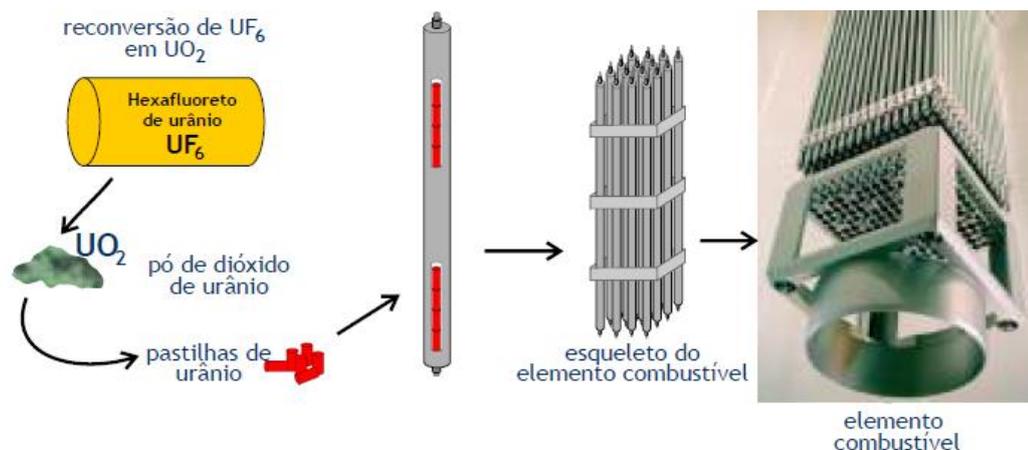


Figura 02: As varetas são fechadas, com o objetivo de não deixar escapar o material nelas contido (o urânio e os elementos resultantes da fissão) e podem suportar altas temperaturas. (CARDOSO, 2012, p. 26)

O vaso do reator é a segunda barreira que impede a emissão da radiação para o ambiente ao redor e é envolvido por uma blindagem radiológica, seguida de uma camada de aço – a contenção – para conter qualquer produto da fissão que não tenha sido bloqueado pelas demais barreiras e um último envoltório de concreto – o edifício do reator –, o qual além de impedir a passagem de material físsil é projetado para resistir a grandes impactos externos (Figura 03).

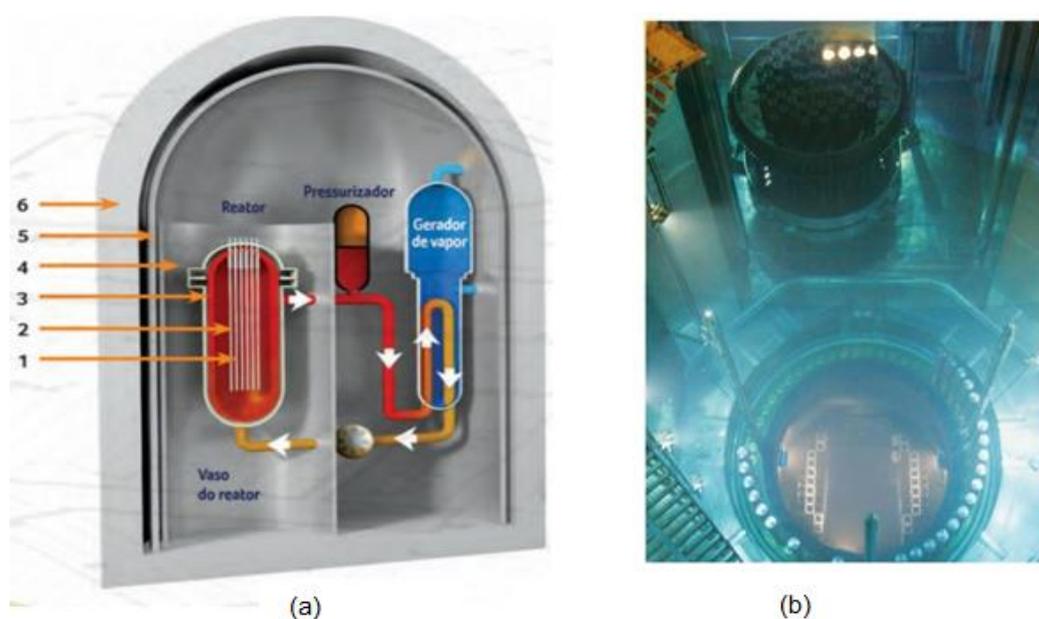


Figura 03: Edifício do Reator visto em sua estrutura interna (a) e externa (b). Na imagem (a) temos: 1 – As pastilhas de dióxido de urânio; 2 – Varetas que contêm as pastilhas; 3 – O vaso do reator; 4 –

Blindagem radiológica; 5 – A contenção de aço e 6 – O edifício de concreto. (ELETROBRAS ELETRONUCLEAR, disponível em <http://online.pubhtml5.com/fqry/twkj/#p=5>)

Mesmo com todos os cuidados para impedir que ocorra um acidente, temos relatos de vazamento de material nuclear em diferentes locais do planeta. O maior deles ocorreu em 26 de abril de 1986 numa usina nuclear construída na década de 1970 a vinte quilômetros da cidade de Chernobyl, ao norte da Ucrânia. Um dos reatores explodiu devido a uma falha humana, como relata Cardoso (2004, p. 27-28), e liberou uma enorme nuvem radioativa que contaminou as pessoas, os animais e o solo da região ao redor da usina.

O Reator estava parando para manutenção periódica anual. Estavam sendo feitos testes na parte elétrica com o Reator quase parando, isto é, funcionando à baixa potência. Para que isso fosse possível, era preciso desligar o Sistema Automático de Segurança, caso contrário, o Reator poderia parar automaticamente durante os testes, o que eles não desejavam. Os reatores deste tipo não podem permanecer muito tempo com potência baixa, porque isso representa riscos muito altos. Ainda assim, a operação continuou desta forma. Os operadores da Sala de Controle do Reator, que não são treinados segundo as normas internacionais de segurança, não obedeceram aos cuidados mínimos, e assim, acabaram perdendo o controle da operação. A temperatura aumentou rapidamente e a água que circulava nos tubos foi total e rapidamente transformada em vapor, de forma explosiva. Houve, portanto, uma explosão de vapor, que arrebentou os tubos, os elementos combustíveis e os blocos de grafite. A explosão foi tão violenta que deslocou a tampa de concreto e destruiu o teto do prédio, que não foi previsto para aguentar tal impacto, deixando o Reator aberto para o meio ambiente. Como o grafite aquecido entra em combustão espontânea, seguiu-se um grande incêndio, arremessando para fora grande parte do material radioativo que estava nos elementos combustíveis, danificados na explosão de vapor.

Devido à tentativa do governo soviético de não espalhar a notícia, centenas de milhares de pessoas morreram – apesar dos dados oficiais do governo afirmarem que teriam sido apenas 4 mil pessoas mortas e 600 mil pessoas afetadas. Este acidente liberou cerca de 400 vezes mais radiação do que a bomba nuclear que foi lançada na cidade de Hiroshima.

A União Soviética tinha como uma de suas cidades modelo do socialismo Prypiat, onde viviam cerca de 50 mil pessoas – trabalhadores da usina e seus familiares. Havia imensos campos de trigo de onde saía grande parte da produção que abastecia o país, mas a poeira radioativa fez com que a cidade fosse evacuada após 36 h do acidente e os níveis de radiação ainda são altos para que possa voltar a ser ocupada. Considerando o tempo de meia vida do

material radioativo, o ser humano só poderá voltar a ocupar a zona contaminada daqui a 100 mil anos!

Hoje a vida selvagem que existia antes da ocupação humana volta a dominar a região. Lobos, castores, cavalos, bizões, dentre outros animais próprios da fauna local estão vivendo e procriando dentro da zona de isolamento que está sendo ocupada pela vegetação. Os níveis altos de radiação parecem não causar danos nestes animais como ocorre com o ser humano.

Outro acidente recente que trouxe ao mundo o medo de novos vazamentos nucleares e levou ao fechamento de algumas usinas ocorreu em janeiro de 2011 no Japão, na cidade de Fukushima, após um tsunami atingir a usina nuclear e ocasionar uma falha no sistema de refrigeração. Também em Fukushima, apesar dos altos níveis de radiação na zona próxima ao reator, a vegetação volta a surgir demonstrando a força da natureza e sugerindo uma pergunta: *O que nós seres humanos temos feito a favor do nosso planeta?* Nos dois acidentes aqui mencionados a natureza parece demonstrar sua força e vontade de continuar a existir mesmo quando o homem promove uma destruição que impede a si mesmo de ocupar estes lugares. Aparentemente somos apenas parasitas que destroem o planeta e usurpam todos seus recursos sem nos preocupar com um futuro que parece não mais tão distante.

Foi a preocupação com o futuro, após o fim da Segunda Guerra Mundial, que levou aos países detentores do conhecimento sobre a bomba nuclear à criação de um órgão que fiscalizasse o uso da energia nuclear em todo o mundo.

O advento da bomba atômica fez do controle e da supervisão internacionais as questões centrais do desarmamento. As potências que haviam contribuído para a bomba estavam profundamente impressionadas pela premência do controle internacional. Em novembro de 1945, os presidentes Harry Truman (EUA), Clement Attlee (Inglaterra) e Mackenzie King (Canadá), conjuntamente, propuseram às Nações Unidas a criação de uma comissão para regulamentar a troca de informações científicas entre todas as nações, controlar a energia atômica para assegurar que só seria utilizada para fins pacíficos, eliminar armas atômicas e outras armas de destruição de massa, e encontrar 'salvaguardas eficazes por meio de inspeções e outros métodos para proteger os estados signatários dos perigos decorrentes de violações e de evasões'. Isto fornecia o principal tópico internacional para a próxima geração. Porém, os russos, que ainda não possuíam a bomba atômica, alegaram que o assunto era de pouca importância. Eles concordaram com a criação da Comissão de Energia Atômica das Nações Unidas em janeiro de 1946, mas aquele órgão, assim como o Comitê do Estado-Maior Militar sob o Artigo 47 da Carta das Nações Unidas, foi um órgão natimorto. (ARCASSA, 2013, p. 9)

A iniciativa de controlar a tecnologia para não criação de mais armas nucleares era dos EUA e os países que não tinham desenvolvido tal tecnologia não aceitaram não poder desenvolvê-la. Como sabemos a utilização da energia nuclear nunca foi controlada e vários países possuem a tecnologia para produzir uma bomba nuclear atualmente. A Guerra Fria que se estendeu pelas quatro décadas após o fim da Segunda Guerra Mundial demonstrou que as armas atômicas não foram eliminadas e, para piorar, foram desenvolvidas armas com poder de destruição ainda maior.

Numa tentativa de impedir uma catástrofe provocada pela explosão de bombas nucleares o então presidente dos Estados Unidos, Dwight D. Eisenhower proferiu um discurso histórico na Assembléia Geral das Nações Unidas, em dezembro de 1953, conhecido como *Atoms for Peace* (Átomos para a Paz). Era uma nova tentativa de gerenciar o uso da energia nuclear, voltada para o uso benéfico desta. Assim, em 29 de julho de 1957, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) foi criada como uma organização integrante da ONU e voltada para o uso da energia nuclear em benefício da humanidade. No documento criado não havia nenhum questionamento sobre o desarmamento dos países que já possuíam a bomba nuclear.

Em 1970 entrou em vigor o Tratado de Não-Proliferação Nuclear (TNP) fortalecendo o papel da AIEA como agência responsável pela: Segurança e Proteção; Ciência e Tecnologia; e, Salvaguarda e Verificação dos assuntos relacionados à energia nuclear. Os acidentes nas usinas de Three Mile Island, nos EUA em 1979 e de Chernobyl, na Ucrânia em 1986, deram ainda mais poder para a AIEA, pois as potências mundiais que competiam durante a Guerra Fria demonstraram incapacidade de gerenciar com segurança o uso da energia nuclear em seus territórios.

Segundo Arcassa (2013, p. 14), após o fim da Guerra Fria, que “virtualmente eliminou o perigo de um conflito nuclear mundial”, a Agência assumiu a vanguarda em diversos campos, como a administração e o descarte de resíduos radioativos gerados no ciclo do combustível nuclear, no uso da radiação e de radioisótopos pela medicina, na produção e explosão de armas nucleares, ou por acidentes que envolvam materiais nucleares (IAEA).

Um dos objetivos da AIEA pensados pelo presidente Eisenhower nunca foi atingido: a eliminação das armas nucleares, como pode ser visto na Tabela 01, contudo a utilização pacífica da energia nuclear se dá em vários setores da sociedade.

NAÇÃO	OGIVAS NUCLEARES
Rússia	8.500
Estados Unidos	7.000
França	300
China	250
Reino Unido	225
Paquistão	100-120
Índia	90-110
Israel	80
Coréia do Norte	6-8
<b>Total</b>	<b>17.270</b>
<i>Armas Operacionais</i>	4.400
<i>Prontas para Uso</i>	2.000

Tabela 01: Arsenal Nuclear Mundial (2013). Fonte: Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). (ARCASSA, 2013, p. 19)

No contexto brasileiro houve um projeto nuclear iniciado em 1956 durante o governo de Juscelino Kubitschek com a criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), mas este projeto só veio a se desenvolver de fato durante o regime militar.

Com a tensão gerada em 1962 pela instalação de mísseis soviéticos em Cuba e a ameaça dos Estados Unidos de atacar a União Soviética, os países latino americanos decidem se unir, em 1963, em um acordo que pretendia não fabricar, receber ou armazenar armas nucleares. Em 1964 dezessete países da América Latina criaram a Comissão Preparatória para a Desnuclearização da América Latina (COPREDAL) em uma reunião em Tlatelolco no México. Posteriormente o projeto se tornou o Tratado de Tlatelolco, sendo assinado por 32 países em 1967 – todos da América Latina, exceto Cuba que o assinou em 1995. As obrigações definidas no tratado foram:

Obrigações  
ARTIGO 1

1. As Partes Contratantes comprometem-se a utilizar, exclusivamente com fins pacíficos, o material e as instalações nucleares submetidos à sua jurisdição, a proibir e a impedir nos respectivos territórios:
  - a. O ensaio, uso, fabricação, produção ou aquisição, por qualquer meio, de toda arma nuclear, por si mesmas, direta ou indiretamente, por mandato de terceiros ou em qualquer outra forma, e
  - b. a recepção, armazenamento, instalação, colocação ou qualquer forma de posse de qualquer arma nuclear, direta ou indiretamente, por si mesmas, por mandato a terceiros, ou de qualquer outro modo.

2. As Partes Contratantes comprometem-se, igualmente, a abster-se de realizar, fomentar ou autorizar, direta ou indiretamente, o ensaio, o uso, a fabricação, a produção, a posse ou o domínio de qualquer arma nuclear, ou de participar nisso por qualquer maneira. (TLATELOLCO, 1967, p. 3)

Segundo Nascimento (2012, p. 9),

O Brasil e a Argentina conseguiram aprofundar os termos do Tratado de Tlatelolco (1967) criando o Organismo para a Proscrição das Armas Nucleares na América Latina e no Caribe (OPANAL) que tem como intuito principal a fiscalização do cumprimento do acordado em Tlatelolco. Esses dois países construíram mecanismos de inspeção mútua criando assim um espaço cooperativo na América Latina que produz um ambiente de maior confiabilidade internacional e de contínuo esforço para seguir os caminhos pacíficos da tecnologia nuclear.

## REFERÊNCIAS

ARCASSA, Wesley de Souza. *Agência Internacional de Energia Atômica: a construção da ordem internacional através dos “átomos para a paz”*. Anais do IV Simpósio de Pós-Graduação em Relações Internacionais do Programa “San Tiago Dantas” (UNESP, UNICAMP e PUC/SP). 2013.

CARDOSO, Elieser de Moura. *Energia Nuclear*. Rio de Janeiro: CNEN, 2004. (Apostila educativa) 29 p. Disponível em: [https://portalnuclear.cnen.gov.br/Material\\_didatico/apostilas/energia.pdf](https://portalnuclear.cnen.gov.br/Material_didatico/apostilas/energia.pdf). Acessado em 29/08/2014.

CARDOSO, Elieser de Moura. *A Energia Nuclear*. 3.ed.- Rio de Janeiro: CNEN, 2012. (Apostila educativa) 52 p. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>. Acessado em: 26/09/2015.

NASCIMENTO, Emmilyne Christine do. *Tratado De Tlatelolco: O Caso do Brasil*. VI Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos de Defesa, 2012.

TRATADO DE TLATELOLCO. *Tratado para a Proscrição de Armas Nucleares na América Latina*. 1967.

Eletronuclear, disponível em

<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes.aspx>. Acessado em 20/09/2015.

## CAPÍTULO 5

### ENERGIA NUCLEAR E IMPACTOS AMBIENTAIS

O uso indiscriminado da energia nuclear pode causar tragédias com proporções devastadoras para a própria humanidade. Em alguns episódios de nossa história o ser humano optou por usar este conhecimento científico com este propósito – bombas atômicas –, mas em outros fomos vítimas de desastres ambientais, como a tsunami que atingiu o Japão em 2011 e danificou o reator de uma indústria nuclear em Fukushima.

É preciso lembrar que a radiação está presente em nossas vidas e que nem toda radiação é prejudicial a nossa vida ou ao ambiente. Recebemos do Sol diferentes radiações em forma de ondas eletromagnéticas, dentre as quais conhecemos a luz visível, a radiação infravermelha e a ultravioleta. A primeira delas detectamos através de nossos olhos, a segunda é responsável pelo aquecimento de nosso planeta através do processo de radiação térmica e também conhecida como ondas de calor. Todo corpo no universo que possui uma temperatura diferente do zero absoluto (0 Kelvin) emite radiação desta natureza. A radiação ultravioleta pode causar danos a nosso corpo, caso haja uma exposição prolongada, como o câncer de pele, mas em pequenas quantidades é fundamental ao ser humano para produção de vitamina D. Outra forma de exposição à radiação está nos alimentos, dentre eles a carne e o leite, como vemos na Figura 01.

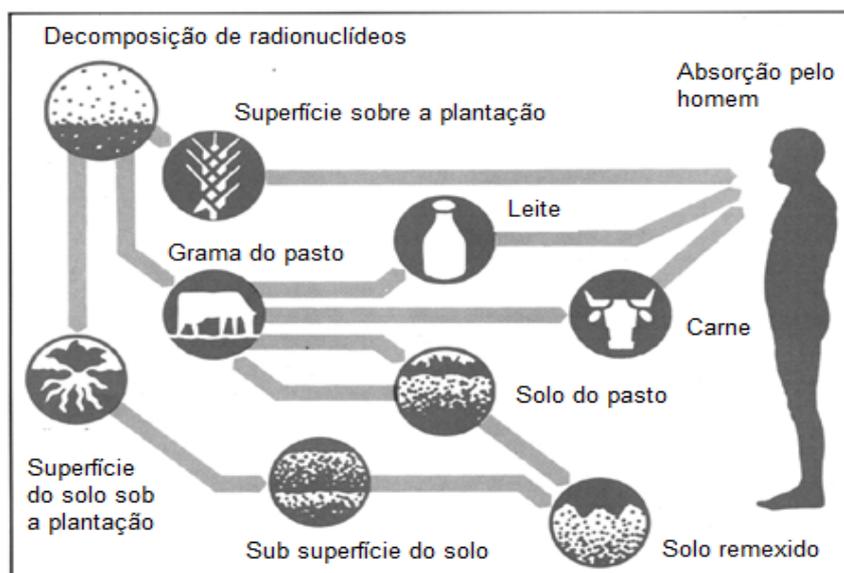


Figura 01: O ciclo de incorporação dos radionuclídeos é apresentado no esquema, descrevendo como os elementos radioativos naturais ou aqueles provenientes do fallout chegam ao homem.

(MELQUIADES, 2004, p. 124)

O fallout representa a radiação que ficou depositada na superfície terrestre devido a explosões nucleares, por exemplo. Os testes nucleares foram proibidos por este motivo, quando, principalmente no hemisfério norte, estava havendo um aumento da concentração de radiação na atmosfera e no solo. A depender da energia da explosão de uma bomba, os resíduos radioativos podem alcançar camadas mais baixas da atmosfera, onde levam até 7 semanas para voltar à superfície do planeta, principalmente através da chuva, ou chegar à estratosfera, podendo levar até 7 anos para retornarem à superfície e podendo atingir qualquer lugar do planeta.

Em uma escala global, a incorporação dos elementos radioativos na biosfera provém da deposição dos elementos da atmosfera para a superfície da Terra, ou seja, através do fallout. Portanto, não podemos imaginar o fallout como um perigo imediato após precipitação, mas, sim, um perigo em potencial. Ao se precipitarem sobre o solo, os produtos de uma explosão nuclear podem depositar-se diretamente sobre os alimentos de homens ou animais, ou então, incorporar-se aos nutrientes dos vegetais e ser por eles absorvidos, quer por via foliar, quer através do solo. Ora, os animais herbívoros estão sujeitos à contaminação, tomando grande importância quando são animais pertencentes à cadeia alimentar do ser humano. Por exemplo, o gado leiteiro: o leite que este produz não escapa à poluição radioativa. Disto pode-se concluir que o leite, um dos mais completos alimentos e que possui um consumo mundial enorme, pode vir a se tornar um integrador de contaminação radioativa.

O fallout a que estamos expostos hoje é proveniente dos testes com armas nucleares que aconteceram entre 1952 e 1963, quando foi assinado um tratado de proibição de testes nucleares na superfície do planeta. (AQUINO, 2012, p. 138-139)

Nas cidades de Hiroshima e Nagasaki, atingidas pelas bombas atômicas que marcaram o fim da 2ª Guerra Mundial, a radiação causou impactos imediatos devido às explosões, mas também se depositou no solo e o contaminou.

A depender do tempo de meia vida do elemento utilizado na arma nuclear – ou na usina que derramou material radioativo –, a radiação emitida pode permanecer décadas ou séculos em algumas regiões que foram expostas, conforme retrata Xavier *et. al.* (2007, p. 85):

Em 1957, fogo em um reator moderado por grafite e resfriado por gás carbônico permitiu a liberação de mais de 700 terabequeréis ( $700 \times 10^{12}$  Bq) de radionuclídeos, principalmente  $^{131}\text{I}$  e  $^{137}\text{Cs}$  (acidente de Windscale). Por um período, a venda de leite oriundo dos rebanhos locais foi proibida. Felizmente, devido ao decaimento natural da radiação depositada, a terra hoje não apresenta contaminação detectável.

Em 26 de abril de 1986, ocorreu o mais grave acidente nuclear da história, em Chernobyl, na atual Ucrânia. A explosão de um dos quatro reatores da usina nuclear soviética de Chernobyl, localizada a 129 km ao norte de Kiev, lançou na atmosfera uma nuvem radioativa de  $3,7 \times 10^{18}$  Bq, desencadeada por uma reação em cadeia fora de controle. A força da explosão liberou uma nuvem radioativa que atingiu a parte oeste da antiga União Soviética, hoje os países de Belarus, Ucrânia e Rússia, e todo o norte e centro da Europa. Mais de 40 radionuclídeos diferentes escaparam do reator em consequência do incêndio nos primeiros 10 dias após o acidente, entre eles elementos e compostos altamente voláteis, como iodo (I-131), sais de céσιο (Cs-137) e estrôncio (Sr-90). Céσιο radioativo, com meia-vida de 30 anos, foi o isótopo disperso mais perigoso, tendo contaminado uma região entre 125.000 e 146.000 km<sup>2</sup>.

O acidente na usina de Chernobyl se tornou ainda mais catastrófico devido ao regime comunista vivido pela União Soviética na época do acidente não adotar medidas preventivas e não comunicar aos países vizinhos sobre o ocorrido. Somente 3 dias após a explosão do reator a Suécia detectou aumento dos níveis de radiação da atmosfera e uma análise feita por satélites detectou o desastre e que a usina ainda estava em chamas. Após 18 dias da explosão, muito esforço e várias pessoas expostas à radiação o reator foi isolado e assim permanece até os dias atuais. Em um pronunciamento de Mikhail Gorbachev, então líder da União Soviética, ele admitiu o acidente da seguinte forma: "*Boa tarde, meus camaradas. Todos vocês sabem que houve um inacreditável erro – o acidente na usina nuclear de Chernobyl. Ele afetou duramente o povo soviético, e chocou a comunidade internacional. Pela primeira vez, nós confrontamos a força real da energia nuclear, fora de controle.*"<sup>2</sup> Souza, et. al. (2014) fizeram uma revisão bibliográfica sobre o acidente de Chernobyl e uma visita ao local do acidente em 2013 e relatam que:

Uma das primeiras preocupações após o acidente foi conter a radiação lançada na atmosfera que atravessava as fronteiras soviéticas. [...] na manhã do sábado de 26 de abril, registros da estação meteorológica nas proximidades de Chernobyl indicavam uma acentuada e súbita elevação nos níveis de radiação indicando que as nuvens contaminadas por elementos radioativos estavam migrando para oeste e norte da Europa. No dia 28 de abril, a 1600 km na Suécia, cerca de 700 funcionários da usina nuclear de Forsmark, ao norte de Estocolmo, apresentaram contaminação nos sapatos e roupas, indicando a chegada da nuvem radioativa. [...] Efetivamente, a contaminação radioativa atingiu tanto o leste quanto o oeste europeu, num total de 1500 km de distância. (SOUZA, 2014, p. 5)

Devido ao incêndio que causou a explosão do reator 4 da usina de Chernobyl, produtos da fissão do urânio como lantânio-140, rutênio-103, céσιο-137, iodo-131, telúrio-132,

---

<sup>2</sup> Discurso disponível em <http://www.nuctec.com.br/educacional/acidentes.html>

estrôncio-89, estrôncio-90 e ítrio-9 se espalharam pela atmosfera e foram disseminadas pela região ao redor da usina, alcançando países vizinhos. Segundo o pronunciamento do governo russo a evacuação dos habitantes de Pripjat, cidade onde moravam os trabalhadores da usina, teve início cerca de 36 horas após a explosão, mas inúmeras vidas foram perdidas por conta da explosão e principalmente pela contaminação causada pela radiação.

Os materiais radioativos que se depositaram no solo foram absorvidos pelas plantas, contaminando a cadeia alimentar. Os seres humanos que se alimentaram diretamente destas plantas ou indiretamente ao consumir carne e leite de bovinos que pastaram nestas regiões também se contaminaram. A radiação não deixa o solo infértil, o que causou a falsa impressão de que a radiação não havia contaminado certas regiões e agravou o problema.

As equipes de emergência (chamados de liquidadores) designadas para limpar as instalações das usinas e arredores, bem como construir uma estrutura para conter a radiação, conhecida como *sarcófago*, receberam altas doses de radiação, mas dentro de um limite aceitável para o ser humano em situações catastróficas, de acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEM) como será tratado no próximo capítulo. Segundo Souza *et. al.* (2014, p.7),

Relatórios publicados pela IAEA indicam que entre 1986 e 1987 240.000 liquidadores foram chamados. Ao todo 600.000 pessoas, entre civis e militares, trabalharam como liquidadores, até 1990, recebendo em média 100 mSv de dose acumulada durante esse período.

Esta experiência negativa serviu para que o ser humano desenvolvesse estratégias para evitar a ocorrência de outros acidentes desta natureza bem como coletar dados sobre os impactos ambientais decorrentes deste desastre. Segundo Xavier (2007, p. 86):

A contaminação, particularmente em meios florestais, tende a alcançar uma estabilidade ecológica. Inicialmente, pensou-se que os níveis de radiação declinariam devido a processos de remoção natural, porém, isto não provou ser a regra. Pelo fato da persistência de contaminação, a importância do envolvimento da parte interessada no desenvolvimento de projetos relacionados à vida em territórios contaminados foi destacada, sendo que as pessoas mais afetadas devem ser diretamente envolvidas nas decisões, para que as mesmas sejam aceitáveis no convívio com a contaminação.

Os ambientalistas e a opinião pública temiam a ocorrência de novos acidentes como o de Chernobyl e várias usinas foram fechadas ou tiveram suas implantações interrompidas em todo o mundo, durante a década de 1990. Além de vazamentos há também o risco de

contaminação devido ao lixo radioativo, o qual é depositado em containers e enterrado ou colocado no interior de minas abandonadas.

Outro problema, além do vazamento, que decorre da existência do lixo nuclear é que um dos produtos da fissão do urânio é o plutônio que também é um material radioativo e pode ser usado em armas nucleares, como a bomba atômica Fat Man. Durante a utilização do material radioativo na usina, o plutônio pode ser “reciclado”, evitando que seja armazenado como lixo nuclear por centenas de anos.

Em 11 de março de 2011 o leste do Japão foi atingido por um tsunami que provocou derramamento de radiação do reator central da usina de Fukushima. Em três dias houve três explosões no reator que necessitava ser resfriado para interromper o processo de fissão nuclear, mas o sistema de resfriamento foi danificado pelo tsunami sendo necessário utilizar água do mar para o resfriamento. Devido à radiação, foi feito um isolamento em um raio de 20 km ao redor da usina para evitar contaminações. Comparando as proporções deste com o acidente em Chernobyl houve uma contenção e evacuação mais rápida, além de uma situação mais favorável aos japoneses em termos da reação nuclear: em Chernobyl os reatores ainda funcionavam quando a estrutura se danificou devido ao aquecimento, enquanto que em Fukushima os reatores já haviam sido desligados, porém era necessário resfriar o reator para evitar explosões e derramamento do material radioativo. Para tanto foram utilizados 320 mil toneladas de água do mar, que se tornou radioativa devido ao contato com o núcleo e precisou ser armazenada em tanques para não contaminar as águas da região.

Infelizmente parte desta água vazou e o governo japonês criou estratégias para minimizar a contaminação do solo e do lençol freático, mas o solo ao redor da usina já foi comprometido. A contaminação pelo ar também é uma possibilidade, como ocorreu em Chernobyl quando os ventos levaram a radiação até países vizinhos.

No ano de 2011, o mundo parou com a notícia de um terremoto seguido de um tsunami no Japão. Como consequência, o sistema de refrigeração do circuito primário (onde estão as varetas de urânio) da usina nuclear de Fukushima foi afetado e um grande acidente nuclear aconteceu. Na realidade, o colapso na usina de Fukushima não foi causado pelo terremoto, embora o tremor tenha atingido assombrosos 8,9 graus na escala Richter (o máximo é 9). O problema começou porque o terremoto cortou as linhas de energia que mantinham ligado o sistema de refrigeração dos reatores. Dentro desses enormes sistemas, que são câmeras de concreto, o combustível nuclear fica mergulhado em piscinas, que ajudam a diminuir o calor. Para casos como esse, as usinas contam com um segundo sistema de refrigeração, movido por geradores a diesel. Porém, em Fukushima, esses geradores estavam em uma área baixa e foram inundados pelo tsunami, a onda gigante

provocada pelo terremoto. A água que envolvia o combustível nuclear esquentou a ponto de começar a evaporar. A pressão nos reatores aumentou, causando explosões que destruíram o telhado dos prédios onde eles ficavam. (AQUINO, 2012, p. 140)

Independente da forma de contaminação – pelo solo, pelo ar ou pelas águas – a fauna e flora da região atingida são destruídas pela radiação. Durante a fissão do urânio numa explosão atômica ou numa usina nuclear, os subprodutos mais perigosos ao ambiente são o iodo radioativo e o céσιο. Conforme visto na Figura 01, a contaminação do solo irá produzir vegetais contaminados, os quais podem ser consumidos diretamente pelo homem ou por outros animais. A cadeia alimentar fica então prejudicada desde sua base e é por isso que alimentos provenientes de regiões atingidas devem ser evitados. Essa contaminação pode permanecer alta na região afetada por décadas, a depender da meia vida do material radioativo utilizado.

A catástrofe de Chernobyl produziu uma radioatividade considerável: centenas de vezes mais matérias radioativas lançadas do que em Hiroxima. Médicos e geneticistas nos falaram longamente sobre os efeitos das doses fracas de radioatividade em dezenas de milhões de pessoas que vivem, bebem, se alimentam e se reproduzem em um meio contaminado: tumores cancerígenos, cardiopatias, fadigas crônicas, doenças inéditas e sentimento de desamparo afetam uma população imensa, e, no meio dessa, sobretudo crianças e jovens. E temem-se efeitos irreversíveis sobre o genoma humano. (DUPUY, 2007, p. 244)

Nas proximidades do reator de Chernobyl na cidade chamada Pripyat, na qual moravam os trabalhadores da usina, mais de 50 mil pessoas tiveram que largar tudo para trás e a cidade permanece inabitada e assim deve permanecer por centenas de anos devido aos altos níveis de radiação. Em Chernobyl o risco de contaminação em alguns lugares é 100 vezes superior ao normal. Recomenda-se aos visitantes que não toquem em nada e que andem apenas pelo caminho de asfalto para evitar contato com o solo. 784.320 hectares de terras agrícolas passaram a ser áreas proibidas para o cultivo. Outros 700.000 hectares tiveram vetada a produção de madeira.

## **REFERÊNCIAS:**

AQUINO, Kátia Aparecida da Silva; AQUINO, Fabiana da Silva. *Radioatividade e meio ambiente: os átomos instáveis da natureza*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2012.

DUPUY, Jean-Pierre. *A catástrofe de Chernobyl vinte anos depois*. Estudos Avançados, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 243-252, Abr. 2007.

MELQUIADES, F. L. e APPOLONI, C. R. *Radioatividade natural em amostras alimentares*. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 21, n. 1: p. 120-126, abr. 2004.

SOUZA, Daiane CB *et al.* CHERNOBYL - O Estado da Arte. International Joint Conference RADIO, 2014. Disponível em [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/46/034/46034422.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/034/46034422.pdf).

XAVIER, Allan Moreira. *Marcos da história da radioatividade e tendências atuais*. Química Nova, Vol. 30, No. 1, 83-91, 2007.

Os Acidentes. Disponível em: <http://www.nuctec.com.br/educacional/acidentes.html>. Acessado em: 18/09/2015.

## CAPÍTULO 6

### ENERGIA NUCLEAR E MEDICINA

Energia nuclear é a energia proveniente de emissões nucleares, diferindo, portanto, de outros tipos de radiações, como a radiação X. Os raios X são gerados devido à transição eletrônica causada por uma vacância deixada por um elétron que recebeu energia e saiu da sua camada eletrônica. Quando outro elétron ocupa o seu lugar, mudando de nível de energia, libera os raios X – nome dado por Wilhelm C. Röntgen, físico alemão que percebeu e registrou a emissão desta radiação desconhecida, em 1895.

Graças ao interesse particular do físico Antoine Henri Becquerel por fluorescência e fosforescência molecular, ele iniciou estudos para determinar se havia alguma ligação entre o brilho destas substâncias e a radiação recentemente descoberta por Röntgen. Assim, Becquerel descobriu em 1896 a radioatividade, proveniente de sais de urânio, capaz de impressionar uma chapa fotográfica, mesmo na ausência de luz. Ele recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1902, juntamente com o casal Pierre e Marie Curie, pela descoberta e estudos sobre a radioatividade. O casal Curie, após saber da descoberta de Becquerel estudou o fenômeno e descobriu que além do urânio, outras substâncias – o polônio e o rádio – também emitiam radiação devido à instabilidade nuclear causada pela relação entre a quantidade de nêutrons e prótons no interior do núcleo. Quando se desintegra, o átomo procura uma forma mais estável, liberando energia e/ou partículas elementares e se transformando em outro átomo de menor número atômico. Inicialmente essa radiação fora chamada de raios de Becquerel, recebendo de Marie Curie a nomenclatura de radioatividade em 1898.

Devido à falta de informação e uma suposta expectativa de que as novas descobertas científicas operassem milagres, o uso da radioatividade passou a ser indiscriminado, levando ao surgimento de doenças.

Para muitos, a radioatividade apresentava propriedades terapêuticas, de forma que surgiram inaladores de radônio, pastas dentais contendo tório, bastões de rádio para preservar dentaduras e dispositivos que continham rádio e tório e eram usados em volta do pescoço para estimular a tireóide, ou ao redor do escroto, para estimular a libido. A ingestão de soluções radioativas era prescrita por médicos para o rejuvenescimento, a cura do câncer de estômago e até o tratamento de doenças mentais. (Sacks 2002, apud MERÇON, 2010, p. 3-4)

Após alguns casos de problemas de saúde devido ao uso destas substâncias elas passaram a ser manipuladas com o devido cuidado. Ironicamente a descoberta que rendeu o Nobel a Becquerel lhe levou a morte em 1908, sendo ele o primeiro caso registrado de falecimento causado pela radioatividade – desenvolvera câncer de pulmão.

Passado mais de um século, dentro do qual houve incidentes com a radiação nuclear como as explosões das bombas que encerraram a II Guerra Mundial; o derramamento de material nuclear na usina de Chernobyl, na Ucrânia-URSS em 1986, e, mais recentemente, em Fukushima, no Japão, em 2011 e a contaminação de inúmeras pessoas no maior acidente envolvendo material radioativo (Césio) do Brasil, em 1987, o ser humano conseguiu controlar os processos de emissão e utilização da radioatividade.

A Física Médica é uma área que se desenvolveu utilizando ferramentas e conhecimentos das ciências físicas aplicadas à saúde e tem crescido nos últimos anos. A medicina nuclear, em específico, trata da utilização de radioisótopos para a obtenção de diagnósticos por imagem e para o tratamento de enfermidades, como afirma Merçon (2010, p. 7)

Como exemplo de uso em diagnóstico, tem-se o uso de iodo-131 no radiodiagnóstico de tireóide e tecnécio-99 em exames de cintilografia de diversos órgãos, como rins e fígado. Já na radioterapia, utiliza-se o cobalto-60 como fonte de radiação na destruição de tumores cancerosos.

O uso dos radioisótopos diferentes se deve a certa preferência destes em se alojar em um órgão específico (Figura 1). Como emitem radiação, estes elementos são detectados e um mecanismo eletrônico produz uma imagem com base concentração de tais elementos. O iodo-131, por exemplo, quando ingerido pelo ser humano se aloja na tireóide, tendo meia vida de oito dias. A quantidade ingerida deste elemento varia a depender da intenção traçada pelo médico. Para uso em terapias que visam eliminar lesões previamente detectadas, é administrada uma dose maior do que a usada em diagnósticos. Segundo Cardoso (2012, p. 38), “o iodo radioativo apresenta as características ideais para aplicação em Medicina, tanto em diagnóstico como em terapia:

- tem meia-vida curta;
- é absorvido preferencialmente por um órgão (a tireóide);
- é eliminado rapidamente do organismo;
- a energia da radiação gama é baixa.”

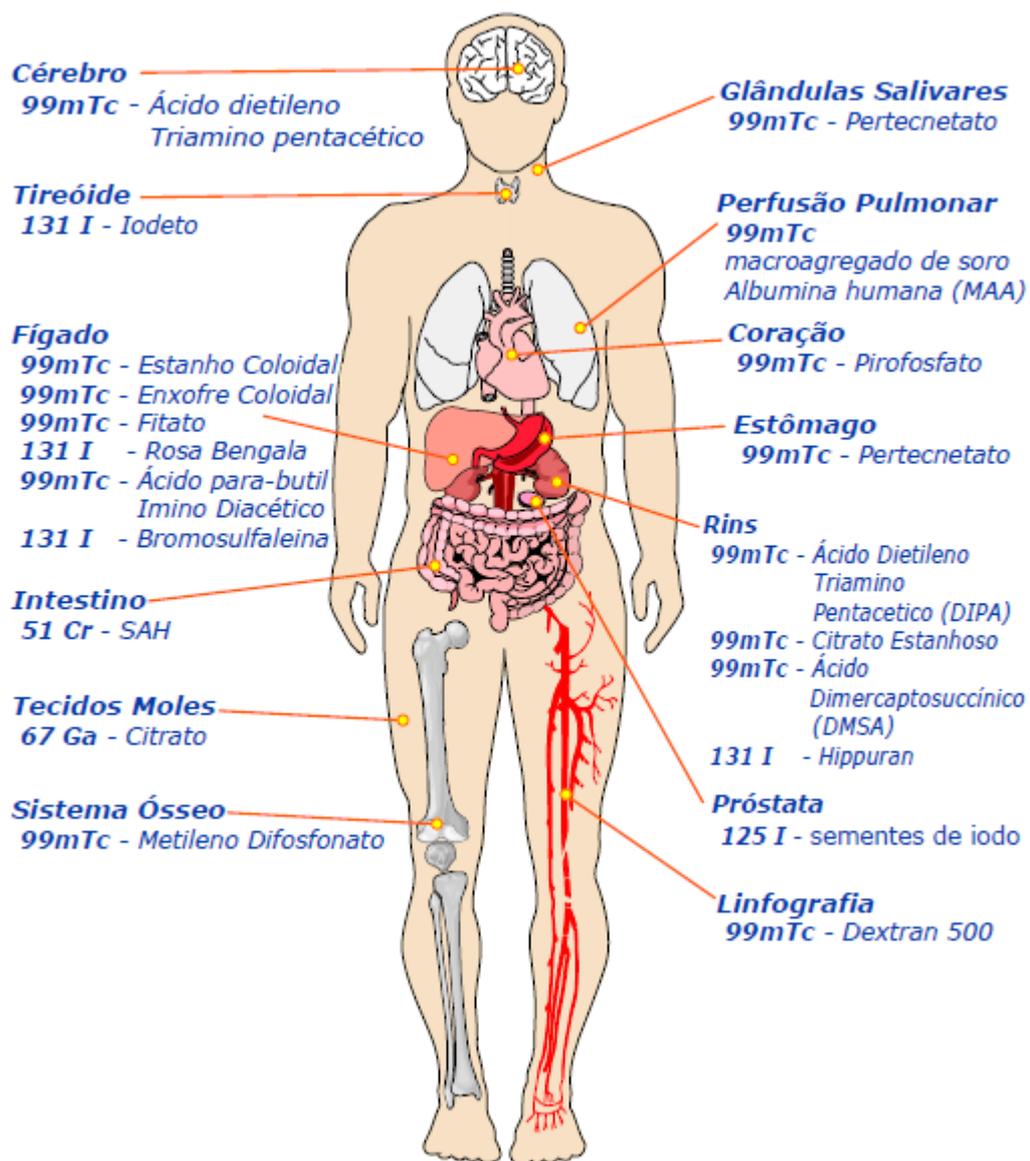


Figura 1: A Energia Nuclear e o corpo humano (CARDOSO, 2012, p. 40)

Alguns radioisótopos são colocados junto a fármacos, criando substâncias chamadas radiofármacos com finalidade de aumentar a afinidade por determinado órgão que se deseja analisar ou tratar.

Apesar da emissão de partículas gama, ou outras formas de radiação, um objeto ou o ser humano exposto a estas radiações para algum tipo de tratamento ou diagnóstico não ficará radioativo. Este efeito só é possível em aceleradores de partículas e em reatores nucleares, como os das usinas produtoras de energia elétrica.

As partículas alfa e beta, a radiação gama e os raios-X são chamados de radiação ionizante devido à capacidade de ionizar um átomo ou uma molécula com o qual interage, ou seja, arrancar um elétron de sua estrutura, transformando-o num íon. A partícula alfa tem a

mesma composição de um núcleo de Hélio, e é emitida naturalmente por elementos mais pesados, tais como o Urânio. Já a partícula beta possui a massa do elétron e pode ter carga elétrica positiva ou negativa. Quando negativa, ela é exatamente o elétron emitido pelo núcleo (negatron) e quando positiva ela é o anti-elétron (similar ao elétron, mas com carga positiva, chamado de pósitron). Este tipo de partícula tem um poder de penetração na matéria maior que a partícula alfa, podendo ser freada por milímetros de metal. Já a radiação gama, também chamada de radiação eletromagnética, ou quanta, não possui carga elétrica e decorre de mudanças de energia dentro do núcleo, e tem um poder de penetração muito maior que as partículas alfa e beta, cerca de 10 cm até alguns metros, a depender do material. Também temos os raios X, que é uma radiação produzida pela excitação de elétrons onde estes pulam de um nível de energia para outro.

Como a partícula alfa é pesada, em comparação com as demais aqui tratadas, devido a massa 4 e carga elétrica +2, ela é ionizante, ou seja, quando analisamos sua trajetória é possível encontrar um rastro de íons negativos e positivos. Os pósitrons são partículas com tempo de vida muito curto, cerca de  $10^{-9}$  s. Quando interagem com um negatron se transformam em radiação gama a qual, devido ao maior poder de penetração, se configura como a mais perigosa para os organismos vivos, apesar de ser a menos ionizante das radiações.

Wilhelm C. Röntgen já havia constatado que os raios-X conseguiam atravessar os corpos; foi quando pediu a sua esposa que colocasse a mão entre a chapa fotográfica e o dispositivo que estava gerando a radiação, obtendo a primeira radiografia da história (Figura 2).



Figura 2: primeira chapa de raios-X. (OLIVEIRA, 2009, p. 15)

Röntgen recebeu o prêmio Nobel de Física de 1901 por suas descobertas e abriu caminho para o estudo e aplicação da Física das radiações.

- Aparelho de raios-X

Os raios X correspondem às radiações eletromagnéticas de comprimento de onda no intervalo de  $10^{-11}$  m a  $10^{-8}$  m e são originários da frenagem dos elétrons gerados no cátodo de uma ampola de Crookes – como fizera Röntgen – ou em um tubo de raios X, que se convertem em fótons, pelo fenômeno conhecido por Bremsstrahlung.

*Bremsstrahlung = Durante o bombardeio do feixe catódico contra o ânodo, alguns elétrons desse feixe que estão dotados de alta energia cinética conseguem se aproximar do núcleo dos átomos alvo e são atraídos por ele. Contudo, como estão em alta velocidade, sofrem apenas um encurvamento da trajetória, perdendo parte de sua energia em forma de fótons de raios X. (GARCIA, 2002, p. 277)*

No interior do tubo o elétron ganha energia devido ao aquecimento e ocorre então a emissão termiônica. Os elétrons são acelerados por uma alta tensão e chocam-se contra uma placa metálica, produzindo os raios-X (Figura 3).

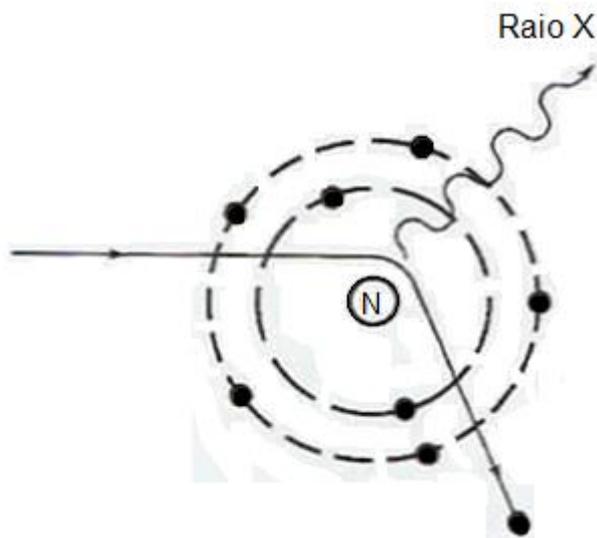


Figura 3: Emissão de raio X devido a frenagem produzida pela força centrípeta do núcleo sobre um elétron-viajante. (GARCIA, 2002, p. 277)

A emissão de raios X pode ocorrer com transferência de energia para um elétron de uma camada interna do átomo – raios X característicos –, conforme explica Brayner, Filho e Hazin (2003, p. 16):

Pelo princípio de exclusão de Pauli, pode-se mostrar que somente dois elétrons podem ocupar orbitas K. Se um elétron provindo do exterior desloca outro da orbita K do átomo, conseqüentemente um elétron da orbita L (ou outra superior), salta para a órbita K e ocupa o lugar vago deixado pelo elétron ejetado, pois o sistema é tanto mais estável quanto mais próximos do núcleo se encontram os elétrons. Uma radiação de frequência  $f$ , correspondente a diferença de níveis de energia entre as orbitas é emitida. Esta radiação é um raio-X. [...]

Raios-X são também emitidos quando a energia de excitação de um núcleo é transferida para um elétron da camada K ejetando-o, e o subsequente salto de um elétron da orbita superior para a órbita K produz a radiação X característica do elemento. Elétrons de conversão interna são monoenergéticos, caracterizando sua distinção com partículas beta emitidas do núcleo, as quais possuem energia variando em uma faixa de valores.

A utilização desta radiação é feita na obtenção de chapas fotográficas para análise das estruturas ósseas do corpo humano, já que os raios X possuem energia suficiente para atravessar nossa pele e órgãos, mas é bloqueada pelos ossos, devido a sua densidade. Em um aparelho médico usado para fazer radiografias não há materiais radioativos - ao contrário do que muitas pessoas possam pensar - e a radiação emitida não fica em nosso corpo.

O papel do físico médico é de atuar na radioproteção a fim de impedir a exposição demasiada à radiação tanto do paciente quanto do operador da máquina de radiografia (médico, enfermeiro ou técnico da área de saúde). Deve-se controlar a magnitude das doses individuais e o número de pessoas expostas e tornar a probabilidade de exposições acidentais tão baixas que se anulem, levando-se em conta fatores sociais e econômicos, além das restrições de dose aplicáveis.

O paciente deve estar informado sobre a região que será atingida pela radiação e se houver algum acompanhante, este deverá vestir um avental de chumbo para se proteger, afinal os raios X não atravessam o chumbo. Além disso, é aconselhado não portar brincos, colares, anéis ou relógios durante o exame e ficar imóvel para obtenção de uma imagem mais nítida. Caso a paciente esteja grávida, o médico deverá ser informado para não causar danos ao feto.

O controle de exposição à radiação tem por base três fatores principais: a) o tempo de exposição, para prevenir o acúmulo desnecessário da dose da radiação; b) a distância da fonte, pois a intensidade da radiação diminui com o inverso do quadrado da distância e c) a blindagem que consiste num anteparo que diminua ou bloqueie a radiação, feito de chumbo, aço, concreto ou outro material.

Para medir a intensidade do impacto da radiação a qual o ser humano fica exposto, usamos a unidade de medida *Sievert* ( $Sv$ ). A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) afirma que embora os riscos de câncer aumentem proporcionalmente com a dose, qualquer

valor de dose recebida por uma pessoa, abaixo de 100 mSv, não mostra nenhum aumento significativo dos riscos da mesma desenvolver câncer. A tabela abaixo (Tabela 1) mostra níveis, limites e referências de dose de radiação para uma comparação simplificada.

PARÂMETRO	VALOR (mSv)	OBSERVAÇÕES
Limite anual para público em situação operacional normal	1	Dose acima da radiação natural. Não inclui aplicações médicas. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.
Aplicações médicas (excluindo radioterapia)	0,03 a 2,0	Média anual Ref.: UNSCEAR 2008
Radiação natural	2,4	Média anual. Ref.: UNSCEAR 2008. Algumas regiões apresentam níveis até 5 vezes maiores, por exemplo, a cidade de Guarapari, ES.
Limite anual para indivíduo ocupacionalmente exposto (trabalhador)	20	Média em 5 anos. Não pode exceder 50 mSv em um único ano. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.
Nível de ação para evacuação de população em situações de emergência	50	Dose a ser evitada. Monitoração no local: taxa: 1 mSv/h. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01 PR-006.
Limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas	100	Com exceção das ações para salvar vidas. Ref.: Norma CNEN-NN-3.01.
Referência para aparecimento de efeitos observáveis.	1000	Os efeitos observados podem ser astenia, náuseas, vômitos.
Dose de corpo inteiro mais alta recebida por uma das vítimas do acidente radiológico em Goiânia, 1987.	8.000	A vítima faleceu tempos depois.

Tabela 1: Níveis, limites e referências de dose de radiação (em mSv) com análise de cada nível de radiação. (CNEN). Disponível em [http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/entendendo\\_radiacao.pdf](http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/entendendo_radiacao.pdf)

Para entendermos comparativamente o nível de radiação ao qual podemos nos expor, durante uma radiografia odontológica panorâmica recebemos uma dose média de 0,01 mSv e em um raio-x de um braço, 0,001 mSv. Assim, reconhecemos que não é aconselhável realizar repetidas vezes um exame como este, mas que o nível de radiação é tão baixo que seriam necessárias algumas dezenas de exames em um ano para que o nível de radiação começasse a ser prejudicial à saúde. O cuidado sempre deve ser em evitar a exposição a grandes doses de radiação e em curtos intervalos de tempo.

- Ressonância Magnética Nuclear

A Ressonância Magnética Nuclear (RMN) é utilizada pela medicina para observar estruturas internas do corpo humano sem que seja necessária uma prática invasiva, como abrir o corpo do paciente. As imagens produzidas de tecidos moles é uma das diferenças em relação às radiografias por raios X.

Neste processo os prótons de hidrogênio do tecido humano interagem com um forte campo magnético externo, produzido pelo equipamento médico, e uma onda eletromagnética de baixa energia é enviada em direção ao tecido. Quando o pulso refletido é coletado com uma radiofrequência diferente da original, o sinal é processado e transformado em imagem, como nos aparelhos de TV.

As imagens de ressonância magnética (MRI do inglês magnetic resonance imaging) podem ser produzidas por vários núcleos de elementos diferentes que estão presentes em nosso corpo, mas segundo Mazzola (2009, p. 118) o hidrogênio é o escolhido por três motivos básicos:

- a) é o mais abundante no corpo humano: cerca de 10% do peso corporal se deve ao hidrogênio;
- b) as características de RMN se diferem bastante entre o hidrogênio presente no tecido normal e no tecido patológico;
- c) o próton do hidrogênio possui o maior momento magnético e, portanto, a maior sensibilidade a RMN.

Todos os núcleos dos elementos apresentam o fenômeno de rotação nuclear – ou momento angular de rotação nuclear. Contudo os valores encontrados para esta rotação dependem do número de prótons e nêutrons do núcleo e possui uma quantização a determinados valores distintos. O hidrogênio possui spin  $+ \frac{1}{2}$  ou  $- \frac{1}{2}$  e podemos imaginar como uma analogia que estes valores representam a possibilidade dele girar em torno de seu eixo para a direita ou para a esquerda.

O termo spin veio como uma explicação do experimento de Stern-Gerlach na década de 20 foi determinada que os prótons que estão contidos nos núcleos dos átomos que realizavam um movimento em torno de seu eixo, o qual foi denominado de spin ou giro em português. Na mesma década foi postulado que o núcleo dos átomos funciona-se com um minúsculo ímã. (OLIVEIRA, 2009, p. 18).

O movimento giratório do núcleo em torno de seu próprio eixo e o momento magnético estão representados na Figura 4. O vetor momento magnético ( $\mu$ ) se relaciona com o spin através da equação:

$$\mu = \gamma \cdot \phi$$

onde  $\gamma$  representa uma característica particular dos núcleos chamada razão giromagnética. Para o hidrogênio, a razão giromagnética é de 42,58 MHz/T.

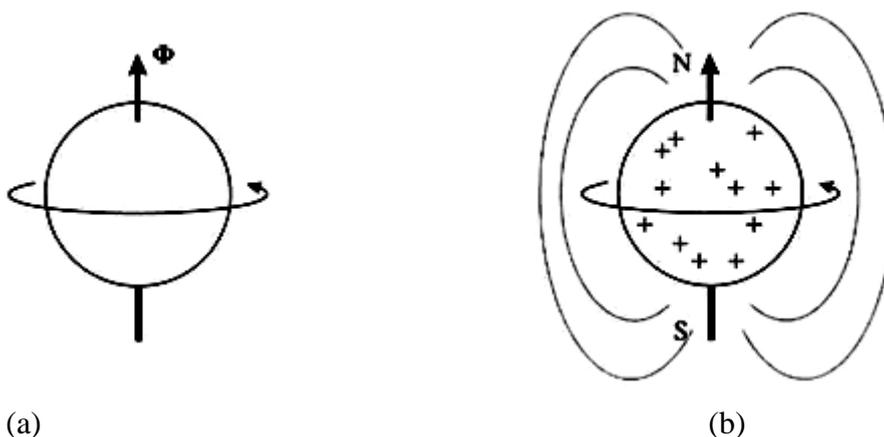


Figura 4: (a) Representação do momento angular de um núcleo ( $\phi$ ) e (b) representação da magnetização microscópica de um núcleo. (QUEIRÓS, 2011, p. 13-14)

Sendo  $\omega_0$  a frequência de precessão de um núcleo, conhecida como frequência de Larmor, esta é dada pela equação:

$$\omega_0 = \gamma \cdot B$$

onde  $B$  representa o campo magnético no qual o átomo está inserido. Para que haja a Ressonância Magnética Nuclear (RMN), é necessário inserir sobre esse sistema uma frequência igual à frequência de precessão do núcleo. Núcleos com precessão podem ganhar energia por ressonância quando submetidos a campos eletromagnéticos adequados. Com isso, a frequência da precessão do seu vetor magnético pode ser controlada e esta ação é fundamental para a produção de imagens de ressonância magnéticas (Lufkin, 1990).

O momento magnético de apenas um átomo de hidrogênio é muito fraco para que seja detectado e, por isso, se faz necessário o alinhamento de vários prótons, através da ação de um campo magnético externo, para conseguir um efeito mais forte a ponto de ser detectado e traduzido em imagem. Os prótons que em seu estado natural se apresentam com spins em várias direções, se orientam (Figura 5) na direção do campo magnético aplicado sobre o

sistema. Algumas dessas partículas irão apresentar alinhamento paralelo ao campo (spin-up) e outras anti-paralelo (spin-down), sendo que a maioria estará paralela ao campo e em estado de menor energia (mais estável).

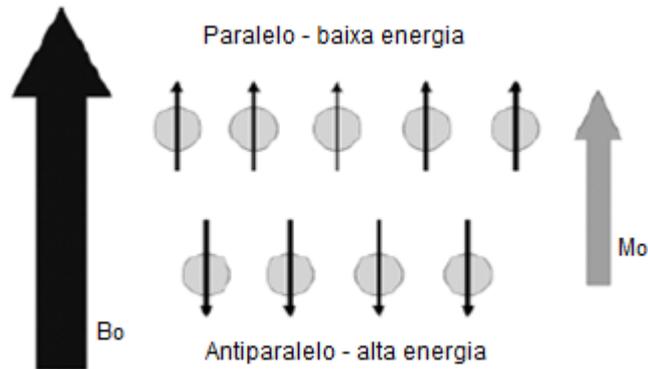


Figura 5: Alinhamento dos prótons após serem submetidos ao campo  $B_0$ . (QUEIRÓS, 2011, p. 15)

A distribuição dos spins nos dois níveis de energia é regida pela equação de Boltzmann (Mazzolla, 2009, p. 118):

$$\frac{N_p}{N_{ap}} = e^{\frac{-E}{K \cdot T}}$$

Onde  $N_P$  é o número de spins alinhados paralelamente,  $N_{AP}$  é o número de spins alinhados antiparalelamente,  $K$  é a constante de Boltzmann  $K = 1,3805 \times 10^{-23}$  joules/kelvin e  $T$  é a temperatura em graus Kelvin.

Submetendo-se o sistema a uma radiofrequência igual à frequência de precessão os spins entrarão em fase e mais prótons ficarão paralelos ao campo externo (Figura 6).

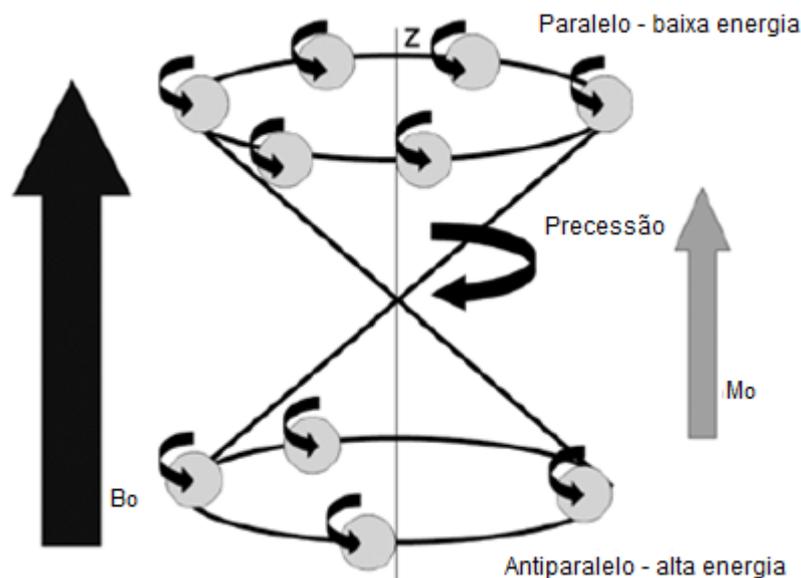


Figura 6: Representação da frequência precessão dos prótons em torno do eixo z do campo magnético forte ( $B_0$ ). (QUEIRÓS, 2011, p. 15)

A produção de imagens das estruturas biológicas por ressonância magnética normalmente utiliza campos magnéticos com intensidade entre 0,02 T a 3,0 T. Para se ter uma ideia da magnitude desses campos, deve considerar que o campo magnético da Terra equivale  $3 \times 10^{-5}$  T, logo os campos usados nas Imagens por Ressonância Magnética (MRI) são 100.000 vezes maiores que o campo magnético terrestre (Panepucci *et.al.*, 1985).

As radiações utilizadas para a determinação da MRI possuem frequências menores que a da cor vermelha (Figura 7). O corpo humano não permite a passagem da luz na faixa do visível, porém é transparente para radiações de alta energia – raios X e raios  $\gamma$ , por exemplo – que podem causar danos às nossas células e por isso não são usadas por esse processo de detecção de imagem.

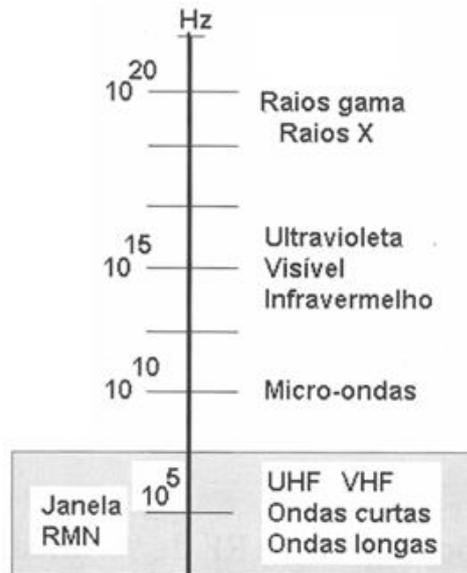


Figura 7: Espectro de frequências eletromagnéticas.

As frequências de baixa energia não causam lesões em seres vivos e por isso são preferidas em detrimento das mais energéticas.

- A profissão de físico médico

O estudo e aplicação de leis, conceitos, modelos e métodos da Física para diagnósticos e tratamentos de doenças define a profissão do Físico Médico. Este profissional tem importante função na supervisão da radioproteção, como já foi mencionado anteriormente, e também na área médica e biomédica. O avanço tecnológico proporcionado pela ciência se distribui pela área médica através do olhar deste profissional que assegura o uso correto e efetivo dos princípios físicos na medicina, controlando a qualidade de equipamentos, gerenciando rejeitos e prestando auxílio burocrático na licença para o funcionamento dos serviços da medicina nuclear.

O inventor francês Leonardo da Vinci (1452 – 1519), ainda no século XVI, já estudava sobre a biomecânica do corpo humano, analisando o movimento do coração, do sangue e a própria locomoção humana, podendo ser considerado como o primeiro físico médico da história. Contudo, vale lembrar que Aristóteles (384 – 322 a.C.) já analisava a anatomia e a estrutura dos seres vivos e tratava da mecânica – na concepção da física – vinculada ao movimento destes seres.

Os avanços do estudo da óptica no século XVII trouxeram inventos que permitiram olhar para o universo (lunetas e telescópios), mas também permitiram enxergar estruturas invisíveis ao olho humano através dos microscópios. Segundo Oliveira (2009, p. 12):

O primeiro microscópio era simples formado por apenas um tubo com uma lente convergente, e assim aumentando a imagem, e era utilizada a luz natural e também possuía uma distância focal muito pequena o que para enxergar o objeto tinha que se aproximarem muito as lentes do mesmo.

A medicina avançou com o aperfeiçoamento do microscópico e das técnicas empregadas em sua construção, saindo de microscópios ópticos para eletrônicos, aumentando o poder de visualização.

No final do século XVIII houve o deslumbramento causado pela associação da eletricidade com o corpo humano quando o médico italiano Luigi Galvani percebeu que alguns anfíbios, mesmo após mortos, reagiam a estímulos provocados por uma corrente elétrica em suas pernas e vários médicos e cientistas começaram suas pesquisas para utilização da eletricidade no corpo humano. Foi exatamente neste contexto de expectativas sobre o poder da eletricidade que surgiu a história de *Frankenstein* (1818), de Mary Shelley, imaginando que a corrente elétrica poderia dar vida a um corpo inanimado, e criando um novo estilo literário chamado ficção científica.

Com o avanço dos estudos em eletromagnetismo surgiram exames como o eletrocardiograma e o eletroencefalograma, criando áreas conhecidas como a bioeletricidade e o bioeletromagnetismo. O estudo dos batimentos cardíacos associados à eletricidade foi iniciada com Augustus Desiré Waller:

Os experimentos de Luigi Galvani chamaram a atenção para a eletricidade animal, não demorou para que Augustus Desiré Waller se interessasse também pela eletricidade animal, fazendo com que ele descobrisse que os batimentos cardíacos ocorriam no mesmo instante em que a corrente elétrica aparecia, e que os mesmos poderiam ser detectados na superfície do corpo, usando eletrodos encostados na pele e conectados a um galvanômetro. (OLIVEIRA, 2009, p. 14).

A área de atuação do físico médico é ampla e diversa, permitindo que este profissional seja um professor de alguma instituição de nível superior, ajudando na formação dos futuros profissionais da área; um pesquisador de alguma instituição que se interesse em procurar por novos métodos, ou pela melhoria dos já existentes, de diagnósticos ou tratamento médico – a esta área de atuação está vinculada a engenharia –; atuante na área técnica de hospitais ou

clínicas, relacionados ao desenvolvimento, comercialização e uso de equipamentos médicos nas áreas de radioterapia, radiodiagnóstico, medicina nuclear, ressonância magnética nuclear, proteção radiológica, dentre outros. Para atuar nesta área técnica o nível de conhecimento tecnológico associado à radiação é imprescindível, pois é o que lida diretamente com a utilização da radiação em pacientes tornando necessário o controle de níveis de radiação, dentro das normas dos órgãos de vigilância sanitária e de controle de níveis de radiação, como a CNEN.

## REFERÊNCIAS

- BRAYNER, Carlos; FILHO, Elias Silva; HAZIN, Clóvis. *Fundamentos de física atômica e nuclear*. Departamento de energia nuclear. UFPE. Abril de 2003
- CARDOSO, Eliezer de Moura. *A energia nuclear* / Eliezer de Moura Cardoso. - 3.ed. - Rio de Janeiro: CNEN, 2012. (Apostila educativa)
- GARCIA, Eduardo A. Cadavid. *Biofísica*. Ed. Sarvier, São Paulo, 1ª edição, 2002.
- LUFKIN, Robert B. *Manual de Ressonância Magnética*. 2 ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1990.
- MAZZOLA, Alessandro A. *Ressonância magnética: princípios de formação da imagem e aplicações em imagem funcional*. Revista Brasileira de Física Médica. 2009; 3(1):117-29
- MERÇON, F. *Radiações: Riscos e Benefícios*. Rio de Janeiro, PUC-RJ, 2010.
- OLIEVEIRA, Rosângela Rodrigues. *A Física aplicada na medicina*. (Trabalho de Conclusão de Curso). Ji-Paraná-RO, 2009.
- PANEPUCCI, H. C.; DONOSO, J. P.; TANNÚS, A.; BECKMANN, N.; BONAGAMBA, T. J. - *Tomografia por Ressonância Magnética Nuclear: Novas Imagens do Corpo* - Ciência Hoje, 4 (20): 46-56, 1985.
- QUEIRÓS, Gabriela Coelho de Pinho. *Análise Computacional de Imagens de Ressonância Magnética Funcional*. (Monografia). 2011.
- [http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/entendendo\\_radiacao.pdf](http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/entendendo_radiacao.pdf)

## ANEXO A

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Universidade Estadual de Feira de Santana

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado (a), como voluntário (a), a participar da pesquisa: **Como uma sequência didática pode ser elaborada para ensinar Física e Energia Nuclear utilizando o episódio da bomba atômica, como tema gerador, através de uma abordagem histórica e sociocultural?**

**RESPONSÁVEIS:** Mestrando, MARCOS VINICIUS LIMA SOUZA; Professores Doutores, INDIANARA LIMA SILVA e ELDER SALES TEIXEIRA.

**INSTITUIÇÃO:** Universidade Estadual de Feira de Santana

**JUSTIFICATIVA:** A proposta de trabalho aqui apresentada busca atender à proposta do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), especificamente na linha de pesquisa Física no Ensino Médio (Área de concentração: Física na Educação Básica). A pesquisa em Ensino de Física tem apontado diversas dificuldades e alternativas para a inserção de conceitos de física na Educação Básica. Em nosso levantamento sobre os temas desse campo de pesquisa, constatamos, de forma quase consensual, que as dificuldades para o ensino de Física Moderna e Contemporânea parecem ainda maiores. Há uma evidente carência de propostas de ensino para essa área da física, ainda que os seus resultados tenham impacto direto em nossas vidas, especialmente relacionadas com o avanço tecnológico (lasers, diodos, tecnologias para celulares e computadores, ressonância magnética nuclear - são alguns exemplos). Preocupados com esta temática e, envolvidos diretamente no debate sobre ensino de física para alunos do Ensino Médio, propomos a elaboração de uma Sequência Didática (SD) com o objetivo de ensinar conceitos de Fissão Nuclear e Energia Nuclear com base na História e Filosofia da Ciência (HFC) e na abordagem da Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA), a partir do episódio da bomba atômica. Pretende-se também abordar as

questões políticas, sociais e éticas subjacentes a construção de tal arma nuclear. A SD, a ser aplicada na sala de aula, faz parte de um conjunto de atividades que culminarão com a dissertação de mestrado a ser defendida junto ao MNPEF.

**OBJETIVOS:** Compreender quais as implicações da SD proposta para o ensino de Fissão Nuclear e Energia Nuclear e apresentar metodologia e resultados obtidos para que outros professores possam utilizar no contexto de outras instituições de ensino, bem como levar para sala de aula discussões que possibilitem a interlocução entre conteúdo e questões político-sociais visando tornar o aprendizado mais efetivo para o aluno e benéfico para a sociedade.

**PROCEDIMENTOS:** Os procedimentos podem ser caracterizados por duas etapas, a saber:

- 1) Aplicação da SD em parceria com os estudantes do 3º ano do Colégio Estadual Governador Luiz Viana Filho, da cidade de Feira de Santana. Esta etapa compreende a coleta de dados da pesquisa. Entenda-se por dados, para efeitos dessa pesquisa, falas, textos e ações dos estudantes em virtude da interação com a SD e com o professor.
- 2) Análise dos dados obtidos do processo de aplicação da SD e posterior publicação de resultados e conclusões.

Os dados serão coletados através de gravações de áudio e textos (produzidos pelos estudantes), sob a responsabilidade do pesquisador. Os estudantes, para efeitos desse trabalho, são considerados sujeitos da pesquisa. A coleta de dados acontecerá em todos os encontros. Apenas o pesquisador responsável e os pesquisadores colaboradores terão acesso aos dados coletados, que serão devidamente arquivados pelo período de 5 anos e serão de uso exclusivo para fins da pesquisa. Após este período os dados serão eliminados e não serão utilizados para avaliação de condutas dos alunos, nem divulgados, em hipótese alguma, para público externo ou interno. Os resultados da pesquisa serão publicados em encontros científicos e revistas especializadas contendo, eventualmente, citações anônimas e utilizando nomes fictícios (pseudônimos) para os estudantes, que terão, assim, sua identidade preservada, e estarão disponíveis a todos, ao final do estudo. Cabe ressaltar que, em qualquer momento, os sujeitos da pesquisa podem solicitar esclarecimentos sobre o uso de dados, bem como se afastarem da pesquisa sem nenhum tipo de censura ou constrangimento.

**DESCONFORTOS, RISCOS E BENEFÍCIOS:** Não deverão ser subestimados eventuais riscos e desconfortos, em qualquer pesquisa que envolva seres humanos, ainda que sejam

mínimos. Do ponto de vista dessa pesquisa, os desconfortos podem ter origem, especialmente, na interação entre professores e alunos, ou mesmo na publicação dos seus resultados. No entanto, dar-se-á ao sujeito da pesquisa, caso necessite, ampla assistência sob a responsabilidade das instituições de ensino envolvidas, bem como pelo MNPEF. No entanto, não encontramos na literatura casos de consequências graves em virtude de pesquisas dessa natureza. Além disso, estaremos à disposição, e dispostos ao diálogo, sempre que necessário.

**GARANTIA DE ESCLARECIMENTO, LIBERDADE DE RECUSA E GARANTIA DE SIGILO:** Você será esclarecido (a) sobre a pesquisa em qualquer aspecto que desejar. Você é livre para recusar-se a participar, retirar seu consentimento ou interromper a participação a qualquer momento. A sua participação é voluntária e a recusa em participar não irá acarretar qualquer penalidade ou constrangimentos.

O pesquisador irá tratar a sua identidade com padrões profissionais de sigilo. Seu nome ou o material que indique a sua participação não será liberado sem a sua permissão. Você não será identificado (a) em nenhuma publicação que possa resultar deste estudo. Uma cópia deste consentimento informado será arquivada no Colegiado do MNPEF da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

É importante destacar, ainda, que a participação no estudo não acarretará custos para você e não será disponível nenhuma compensação financeira adicional em caso de haver gastos de tempo, transporte, creche, alimentação, etc.

Este termo constará de duas vias, uma que ficará de posse do pesquisador e outra de posse do participante.

Agradeço a atenção e estou à disposição para maiores esclarecimentos que julgue necessário sobre a metodologia.

**DECLARAÇÃO SUJEITO DA PESQUISA OU DO SEU RESPONSÁVEL:** Eu, \_\_\_\_\_ fui informada (o) dos objetivos da pesquisa acima de maneira clara e detalhada e esclareci minhas dúvidas. Sei que em qualquer momento poderei solicitar novas informações e motivar minha decisão se assim o desejar. O mestrando, **MARCOS VINICIUS LIMA SOUZA** certificou-me de que todos os dados desta pesquisa serão confidenciais.

Em caso de dúvidas poderei chamar o mestrando, MARCOS VINICIUS LIMA SOUZA, o professor orientador ou o professor co-orientador no telefone (75) 988052204, e-mail mvlima.fisico@gmail.com, ou o Colegiado do MNPEF, através do seguinte endereço: Avenida Transnordestina, S/N. Bairro, Novo Horizonte. CEP 44036900. Feira de Santana-Ba. Telefone: (75) 36218206.

Declaro que concordo em participar desse estudo. Recebi uma cópia deste termo de consentimento livre e esclarecido e me foi dada a oportunidade de ler e esclarecer as minhas dúvidas.

---

Assinatura do sujeito da pesquisa ou do seu representante legal (para menores de 18 anos)

---

Assinatura do pesquisador

## **ANEXO B**

### **MERGULHANDO NO NÚCLEO ATÔMICO**

Telecurso 2000 – Física, Aula 48

Disponível em [http://www.fisica.net/nuclear/fisica\\_nuclear\\_telecurso.pdf](http://www.fisica.net/nuclear/fisica_nuclear_telecurso.pdf), acessado em 29 de agosto de 2014

## Mergulhando no núcleo do átomo



Outro dia, Maristela chegou atrasada ao trabalho. Também, não é para menos: estudar de noite e trabalhar de dia não é nada fácil! Ela estava muito cansada e, para piorar as coisas, o despertador quebrou: simplesmente parou de funcionar, e ela continuou dormindo. Acontece!

Quando finalmente acordou, Maristela pegou o despertador e olhou bem para ele. Não sabia o que tinha acontecido e, além disso, não entendia nada sobre o seu funcionamento. Mas, muito curiosa, resolveu investigar...

- Vou tentar abrir este despertador. Quem sabe eu consigo arrumá-lo! Assim não preciso levá-lo para consertar, e ainda faço um pouco de economia!

Maristela ficou surpresa ao verificar que no despertador não havia nenhum parafuso!

- Se eu não abrir o despertador, como vou poder estudá-lo e tentar compreender o seu funcionamento? O que vou fazer?

Maristela ficou furiosa!

- Estou com vontade de atirar esta "coisa" na parede! Assim eu poderia ver o que tem lá dentro! Mas acho que ele nunca mais iria funcionar... - concluiu, desanimada.

Se atirasse o relógio contra a parede com muita força, para que ele se dividisse em muitos pedacinhos, Maristela iria pelo menos saber o que havia dentro dele. É claro que essa não é uma maneira muito esperta de estudar o funcionamento e os componentes de um relógio, mas pode ser uma excelente idéia para estudar a matéria! Você vai descobrir por quê.

### Mergulhando mais fundo na matéria



No início deste século, o modelo adotado para descrever o átomo era o de **Rutherford-Bohr**, que estudamos na aula passada. Muitos cientistas trabalhavam nesse campo, o da **física atômica**. Eles sabiam que alguns materiais emitem **radiação** e algumas formas diferentes de radiação já haviam sido observadas - inicialmente por **Wilhelm Röntgen** (raios X, que estudaremos mais adiante), em 1895, depois por **Henri Becquerel** e por **Marie Curie** (raios alfa), em 1896.

Uma dessas formas de radiação são as partículas **alfa**, de que falamos na aula passada. Você deve lembrar que as alfas foram usadas por Rutherford para investigar a estrutura do átomo. Mais tarde elas também foram usadas para investigar o próprio **núcleo atômico**. As alfas são partículas com carga positiva, e hoje nós sabemos que cada alfa é igual ao núcleo do átomo de **hélío** – um elemento químico que possui dois prótons no núcleo, isto é,  $Z=2$ . Portanto, uma partícula alfa é um átomo de hélio, mas sem os elétrons.

Quando investigamos o núcleo atômico, mergulhamos mais fundo na matéria e entramos no campo da **física nuclear**.

Juntamente com Rutherford, um cientista que contribuiu muito para a física nuclear foi **James Chadwick**. Em 1932, ele bombardeou o elemento **berílio** com partículas alfa e observou um tipo de radiação capaz de atravessar camadas muito grossas de matéria. Concluiu que essa radiação era formada por partículas diferentes das alfas, por duas razões: não tinham carga elétrica (eram neutras) e eram mais leves (tinham massa quase igual à do **próton**).

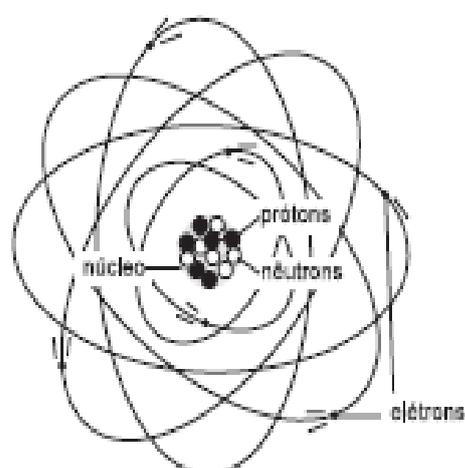


Figura 1. Esquema do átomo com prótons, nêutrons e elétrons

Por ser neutra, a nova partícula foi chamada de **nêutron**. Chadwick concluiu que os **nêutrons** vinham de dentro do **núcleo**, onde estavam junto com os **prótons**. Prótons e nêutrons compõem o **núcleo do átomo**, como mostra a Figura 1. É claro que nesta figura o núcleo aparece bem maior do que realmente é: para as órbitas que foram desenhadas, o núcleo seria invisível.

### Como o núcleo se mantém unido?

Devido à força elétrica repulsiva, os prótons deveriam se afastar uns dos outros. Os nêutrons não possuem carga elétrica, logo não interagem por meio da força elétrica. Então, **como é que todas essas partículas se mantêm unidas, formando o núcleo?**

Se não é a força elétrica que as mantém juntas, você pode imaginar que talvez isso ocorra por causa da atração gravitacional. Vamos ver. Na Aula 37 você teve oportunidade de calcular a intensidade da força elétrica e da força gravitacional entre um próton e um elétron. Deve lembrar que a força gravitacional é muito menor que a força elétrica. Portanto, podemos concluir que também não é a força gravitacional o que mantém as partículas nucleares unidas!

Para explicar a existência do núcleo atômico foi necessário imaginar a existência de um novo tipo de força: a **força nuclear**. A idéia é que entre duas partículas nucleares existe uma **força muito intensa** – muito mais intensa que a força gravitacional e que a força elétrica – que é responsável pela união dos prótons e nêutrons no núcleo.

No quadro abaixo relacionamos as forças fundamentais que você já conhece, e indicamos também entre que tipos de partículas elas existem:

TIPO DE FORÇA	ENTRE...	INTENSIDADE	ATRATIVA OU REPULSIVA?
gravitacional	massas	muito fraca	sempre atrativa
elétrica	partículas com carga elétrica	fraca	atrativa ou repulsiva
nuclear	partículas nucleares	forte	sempre atrativa

### Mas nem todos os núcleos permanecem unidos...

Na aula passada falamos na **radioatividade**. Esse fenômeno é conhecido desde o final do século passado e é caracterizado pela emissão de radiação. Naquela época, eram conhecidas três formas de radiação: os raios **alfa**, **beta** e **gama**. As alfas você já conhece. As betas são partículas bem mais leves do que as alfas, iguais aos elétrons que existem ao redor do núcleo. As betas, porém, são produzidas em reações que ocorrem no interior do núcleo atômico. A radiação gama é semelhante à luz.

Mais tarde descobriu-se que existem dois tipos de betas: as negativas, como os elétrons, e as positivas, chamadas também de **pósitrons**, que são semelhantes aos elétrons, sendo também produzidas em reações nucleares, mas possuem carga elétrica positiva.

Observe o quadro abaixo:

PARTÍCULA	SÍMBOLO	O QUE É?	CARGA ELÉTRICA
alfa	$\alpha$	2 prótons + 2 nêutrons	positiva
beta <sup>+</sup>	$\beta^+$	pósitron	positiva
beta <sup>-</sup>	$\beta^-$	elétron	negativa

Você deve ter observado, pela tabela acima, que essas partículas **possuem carga elétrica**. Essa característica da radiação torna-a muito perigosa. Vamos entender por que estudando o processo de emissão de partículas.

Nem todos os elementos químicos são radioativos. O hidrogênio, o nitrogênio, o oxigênio – a maioria dos elementos – são estáveis e não emitem nenhum tipo de radiação. Mas alguns elementos são instáveis e emitem partículas.

Ao emitir radiação, o núcleo de um elemento químico radioativo perde partes de si. Veja o seguinte exemplo: no núcleo do elemento urânio existem 92 prótons, portanto  $Z = 92$ . O que ocorre quando ele emite uma partícula alfa, formada por dois prótons e dois nêutrons? Observe o esquema:



Você já sabe que cada elemento químico é caracterizado pelo seu número atômico, **Z**. Ao emitir a alfa, o núcleo de urânio perde dois prótons e dois nêutrons, transformando-se em outro elemento químico, que tem  $Z = 90$  e se chamado tório.

E o que acontece com a alfa que foi emitida? Ela caminha solta pelo espaço até encontrar matéria, onde é absorvida. O problema é quando essa alfa encontra, por exemplo, o nosso corpo...

## Os perigos da radiação

As partículas saem do núcleo radioativo com bastante energia cinética. Ao penetrar na matéria, elas transferem energia aos átomos e moléculas que encontram, até perder toda a sua energia e parar.

Se essa matéria for o corpo humano podem ocorrer lesões, leves ou mais graves, dependendo da energia das partículas. Essas lesões podem ocorrer na pele ou em órgãos internos do corpo: com grande energia, a radiação é capaz de destruir as moléculas que compõem esses órgãos.

O principal problema da radiação formada por partículas carregadas é o fato de que elas podem arrancar elétrons dos átomos que constituem o meio por onde passam. Quando o átomo perde elétrons, deixa de ser neutro: ele se transforma num **íon**. Esse fenômeno é conhecido como **ionização**.

Apesar de todos os efeitos negativos da radiação, ela tem também aspectos muito positivos. Usada controladamente, pode ajudar no combate de doenças. É o caso da radioterapia aplicada ao tratamento de câncer.

Nas usinas nucleares, esses elementos radioativos são de grande utilidade. O núcleo de certos elementos, como o urânio, sofre uma divisão, chamada de **fissão nuclear**. Nesse processo, o núcleo libera uma enorme quantidade de energia que, por vir do núcleo, se chama energia nuclear.

Essa energia pode ser transformada em outras formas de energia - térmica e elétrica - úteis ao homem. A energia nuclear produzida de forma controlada nas usinas nucleares também pode ser gerada sem controle por **bombas nucleares**, as armas mais destrutivas já inventadas pela humanidade.

A energia do Sol, que permite a vida na Terra, tem sua origem nas **reações nucleares** que ocorrem no interior do Sol: vários prótons se fundem para formar um núcleo de hélio e liberam grandes quantidades de energia nesse processo, que se chama de  **fusão nuclear**.

Além da energia que vem do Sol, a Terra é bombardeada continuamente por partículas de alta energia vindas do espaço interestelar. São os **raios cósmicos**, formados principalmente por prótons. Os raios cósmicos penetram na atmosfera terrestre, onde colidem com átomos dos vários gases que compõem a atmosfera. Essa colisão provoca reações nucleares, a partir das quais são criadas várias partículas subnucleares.

Em 1947, o físico brasileiro César Lattes participou da descoberta de uma nova partícula na radiação cósmica, chamada de **píon**. Essa partícula é mais leve que o próton e o nêutron, porém mais pesada do que o elétron. Além do píon, outras partículas foram descobertas nos raios cósmicos, como os **múons**.

## E o que mais?

Você deve ter notado o caminho seguido pela ciência: primeiro acreditava-se que o átomo era indivisível. Então descobriu-se que ele tem um núcleo e os elétrons. Depois descobriu-se que também o núcleo tem uma estrutura, sendo formado por prótons e nêutrons.

A pergunta mais natural agora seria: **serão os prótons e nêutrons indivisíveis?** Ou eles também têm uma estrutura? Existirão outras partículas ainda menores formando prótons e nêutrons? É esse conhecimento que os chamados **físicos de partículas** vêm perseguindo desde a segunda metade do século: eles buscam conhecer a estrutura das partículas subnucleares!

A situação deles é parecida com a de Maristela às voltas com o despertador: como fazer para saber o que há lá dentro, se não é possível “abrir e olhar”?

A idéia que os físicos tiveram foi “atirar as partículas contra a parede”! Rutherford fez algo semelhante para estudar o átomo, ao atirar partículas alfa sobre uma fina placa de ouro. Ocorre que, para “quebrar” as partículas nucleares, é preciso muita, muita energia: é preciso atirá-las com muita força contra um alvo!

As partículas dos raios cósmicos têm muita energia e foram utilizadas para descobrir novas partículas. Mas, à medida que o conhecimento foi avançando, tornou-se necessário atingir energias ainda maiores. Então, a partir de 1960, começaram a ser construídos os chamados **aceleradores de partículas**: equipamentos supersofisticados que foram construídos graças a grandes avanços tecnológicos, como os equipamentos eletrônicos e digitais, a obtenção de superfícies metálicas superlimpas e lisas, medidores de correntes e de voltagens de alta precisão, amplificadores, osciloscópios e outros, além dos já citados na aula anterior.

Esses equipamentos produzem campos elétricos intensos, que fornecem uma grande quantidade de energia cinética às partículas carregadas eletricamente; assim, elas são aceleradas a grandes velocidades. Essas partículas colidem com átomos e da colisão surgem novas partículas que são estudadas.

Tais estudos mostram que os prótons, os nêutrons e os píons têm uma estrutura: são formados por partículas ainda menores, chamadas de **partículas elementares**. As partículas elementares recebem esse nome porque se acredita que elas sejam os menores componentes da matéria. Portanto, não seriam formadas por outras partículas menores. Daí vem o nome elementar.

Quais são as partículas elementares que conhecemos hoje? Para não complicar muito a história, vamos conhecer apenas dois tipos.

Uma partícula elementar é o elétron. Até hoje acredita-se que o elétron é indivisível.

A outra partícula elementar tem um nome estranho: **quark**. Existem seis tipos de quarks, mas por ora só nos interessam aqueles que formam os prótons e os nêutrons. São dois tipos, que também têm nomes estranhos: **up** (que vem do inglês e significa “para cima”) e **down** (que significa “para baixo”). No próton existem dois quarks up e um quark down. No nêutron existem um quark up e dois quarks down, como mostra a figura abaixo:

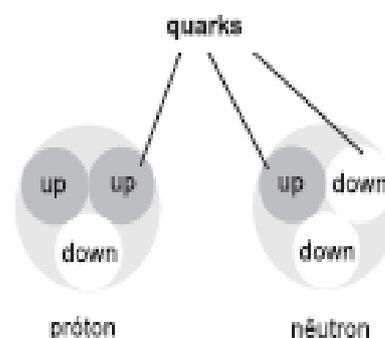


Figura 2. Esquema do próton e do nêutron com os quarks

Alguns homens continuam a investigar a natureza, tentando desvendar ainda mais os seus mistérios. À medida que aumenta o nosso conhecimento sobre a natureza, aprendemos novas formas de estudá-la: novas e mais sofisticadas técnicas experimentais. Utilizando esses métodos mais poderosos para estudar a natureza, podemos aprofundar ainda mais o nosso conhecimento. Muitas vezes descobrimos novos fenômenos que não eram observados antes; para explicar esses novos fenômenos, somos incentivados a criar novos modelos teóricos. Testando esses novos modelos, aprofundamos nosso conhecimento e nossa capacidade de investigar a natureza... e assim continua! O processo segue em frente. Até quando? Não sabemos, e não sabemos sequer se um dia ele irá terminar...

Nesta aula você aprendeu que:

- o núcleo do átomo é formado por dois tipos de partículas: os **prótons** e os **nêutrons**;
- existe uma força que mantém prótons e nêutrons, unidos formando o núcleo: a **força nuclear**. Ela é muito mais intensa que a força elétrica e que a força gravitacional;
- os átomos são eletricamente **neutros** (carga elétrica total é zero) e a maioria deles é **estável**;
- os átomos de alguns elementos químicos emitem partículas e se transformam em átomos de outros elementos químicos: esse fenômeno é conhecido como **radioatividade**;
- existem várias formas de radiação, entre elas as partículas alfa, beta e os raios gama;
- a radiação pode ser prejudicial à saúde, causando queimaduras e lesões, destruindo moléculas do nosso organismo, mas também pode ser usada no tratamento de doenças;
- quando os núcleos se dividem, liberam grandes quantidades de energia. Esse processo é chamado de **fissão nuclear** e a energia liberada por ele é a **energia nuclear**, que pode ser transformada em outras formas de energia úteis ao homem;
- a energia proveniente do Sol também é de origem nuclear: ela é gerada pelo processo de **fusão nuclear**;
- os **raios cósmicos** são formados por partículas de alta energia, vindas do espaço interestelar, que bombardeiam continuamente a Terra;
- prótons, nêutrons e píons são formados por outras partículas ainda menores: os **quarks**. Os **quarks** e os **elétrons** são **partículas elementares**, isto é, os cientistas acreditam que estes sejam os menores componentes do universo.





### Exercício 1

Complete:

O núcleo atômico é formado por dois tipos de partículas: **(a)** ....., que têm carga elétrica de valor igual à do elétron, mas de sinal **(b)** ....., e **(c)** ....., que tem massa igual à anterior, mas são eletricamente **(d)** ..... Entre essas partículas age a força **(e)** ....., muito mais intensa do que as outras forças fundamentais que conhecemos, que são a força **(f)** ..... e a força **(g)** ..... A força nuclear age em pequenas distâncias, dentro do núcleo, e não faz efeito em distâncias maiores.

### Exercício 2

Complete:

Existem outras partículas que interagem por meio da força nuclear, como os píons. O físico brasileiro **(a)** ..... participou da sua descoberta em 1947. A massa dos píons é cerca de um sétimo da massa dos prótons.

### Exercício 3

Complete:

Existem núcleos radioativos que emitem partículas espontaneamente. É o caso do urânio, que tem 92 **(a)** ..... no núcleo. Ao emitir uma partícula alfa, que possui dois **(b)** ..... e dois **(c)** ....., o urânio se transforma em outro elemento químico, que tem apenas **(d)** ..... prótons no núcleo e se chama tório.

### Exercício 4

Complete:

Os raios cósmicos são partículas de alta **(a)** ..... que incidem sobre a Terra vindas do espaço. Quando penetram na atmosfera, provocam reações nucleares em que são produzidas outras partículas, como os **(b)** .....

### Exercício 5

Complete:

Hoje sabemos que os prótons e nêutrons, são compostos por "partículas elementares", isto é, que não podem mais ser subdivididas. Essas partículas se chamam **(a)** ..... Os prótons e nêutrons são formados por **(b)** ..... quarks cada.

### Exercício 6

Complete:

As grandes energias devidas à força nuclear aparecem no processo de **(a)** ..... nuclear. Ele ocorre quando um núcleo pesado, como o do urânio, se divide em vários núcleos mais leves, e no processo de **(b)** ..... nuclear que ocorre no interior de estrelas, como o Sol, quando vários núcleos leves se unem para formar núcleos mais pesados.

## ANEXO C

### IMAGENS UTILIZADAS NO PRIMEIRO ENCONTRO

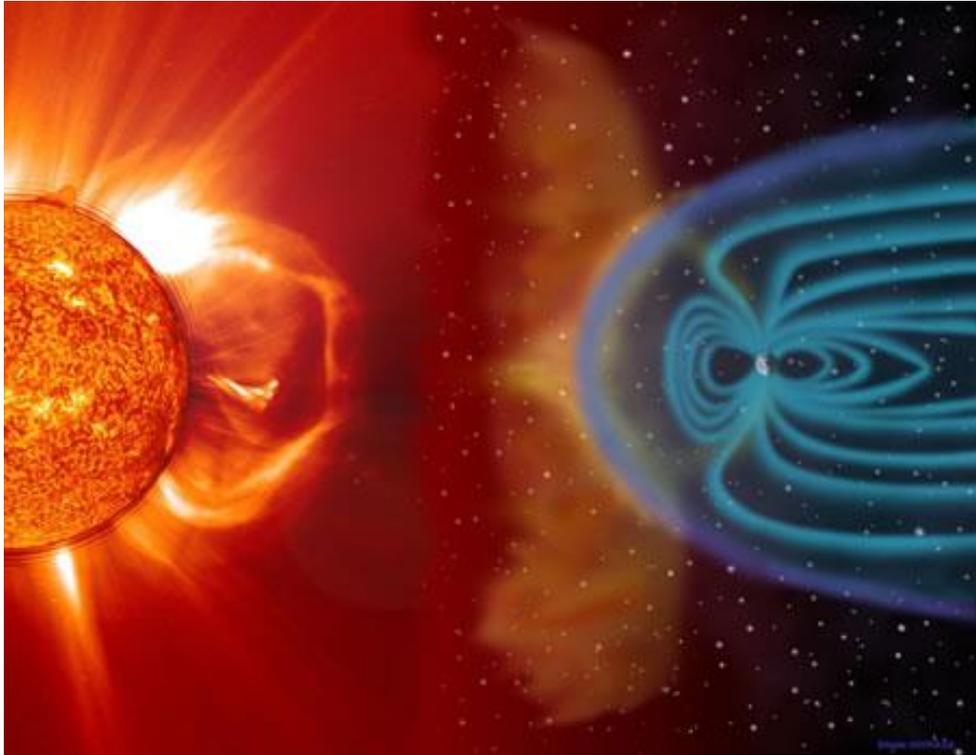


Figura 01: Ventos Solares e Campo Magnético da Terra.



Figura 02: Aurora Boreal.



Figura 03: Aparelho de Raios-X.

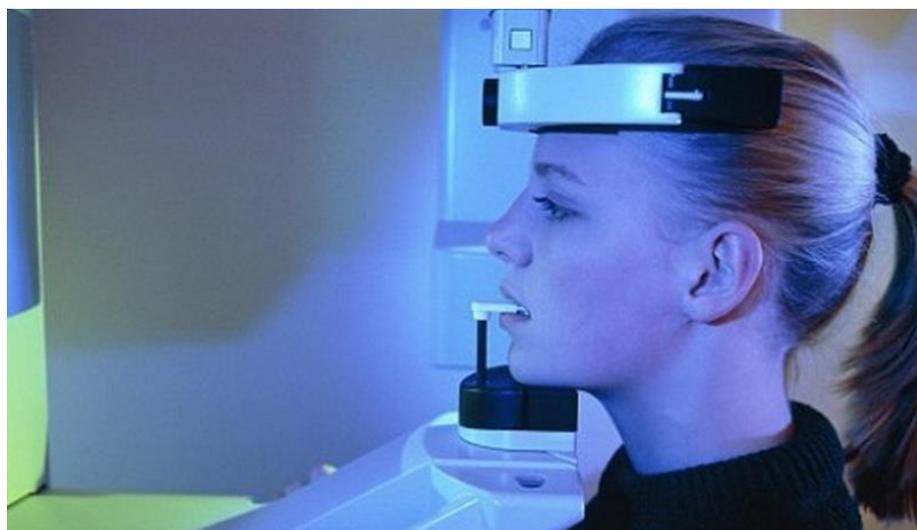


Figura 04: Radiografia para dentistas.



Figura 05: Wilhelm Conrad Roentgen (direita) e a primeira radiografia da história (mão de sua esposa).



Figura 06: Explosão de uma bomba atômica.



Figura 07: Paul Tibbets e o Enola Gay.



Uma cópia exata da bomba Little Boy, no pós-guerra.



Cópia da bomba atômica "Fat Man".

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Bombardeamentos\\_de\\_Hiroshima\\_e\\_Nagasaki](http://pt.wikipedia.org/wiki/Bombardeamentos_de_Hiroshima_e_Nagasaki)

Figura 08: Cópias das bombas atômicas lançadas sobre o Japão em 1945: Little Boy (acima) foi lançada sobre Hiroshima e Fat man (abaixo) lançada sobre Nagasaki.



Figura 09: Aparelho de Ressonância Magnética.

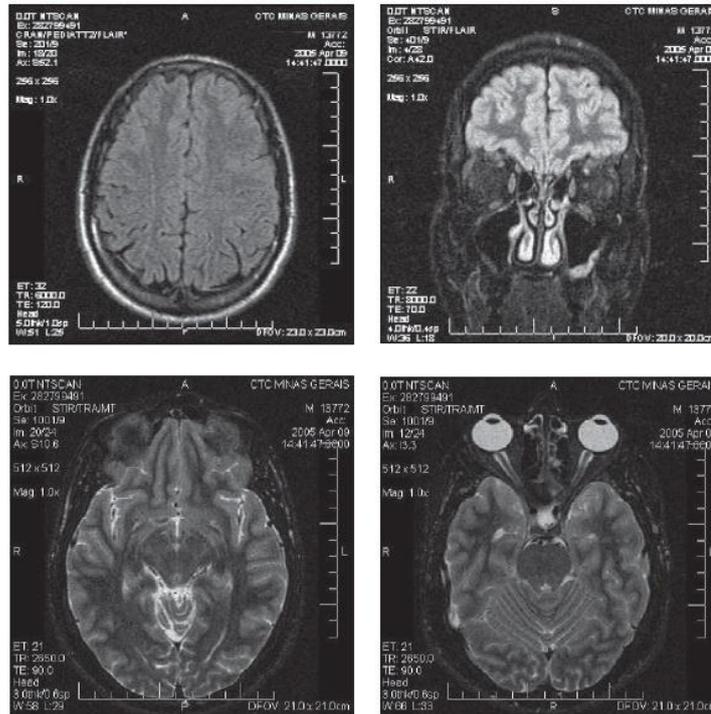


Figura 3: Ressonância magnética – encéfalo dentro da normalidade

Figura 10: Ressonância Magnética de encéfalo.

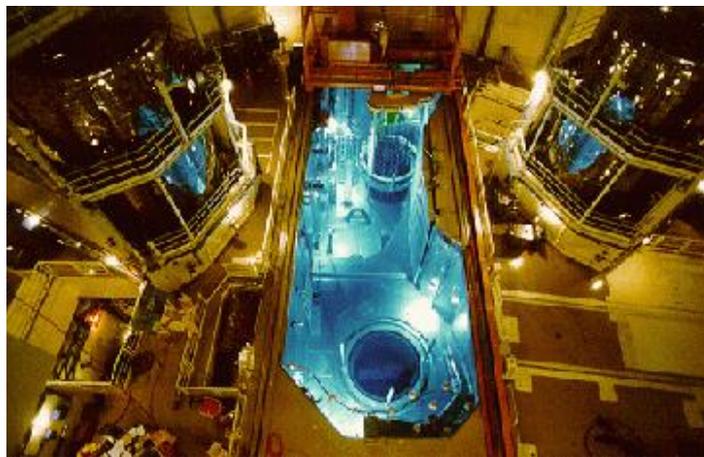


Figura 11: Imagem do interior de uma usina nuclear.



Figura 12: Usina Nuclear de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro – Brasil.



Figura 13: Usina Nuclear de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro – Brasil.



Figura 14: Usina Nuclear de Fukushima – Japão.

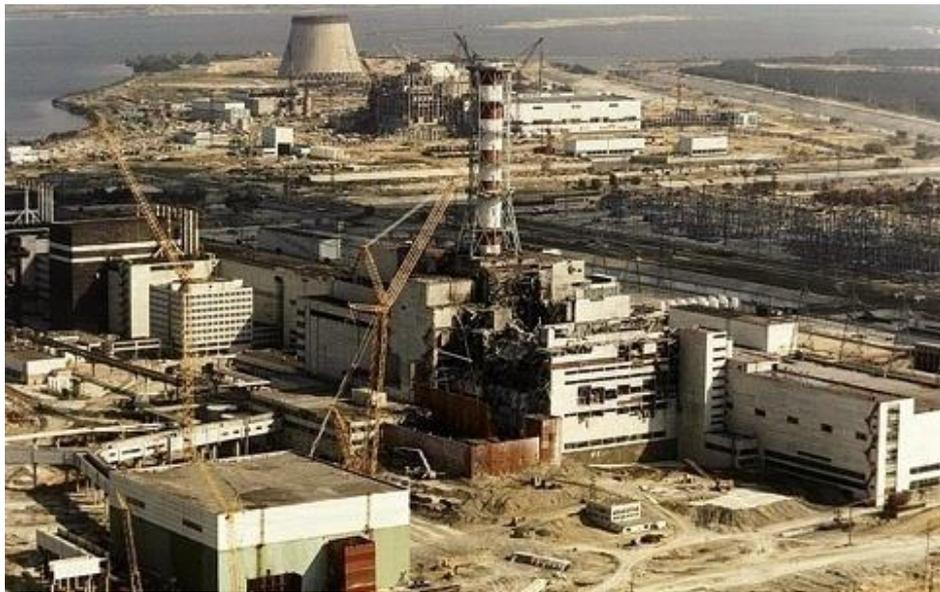


Figura 15: Usina Nuclear de Chernobyl – Ucrânia.

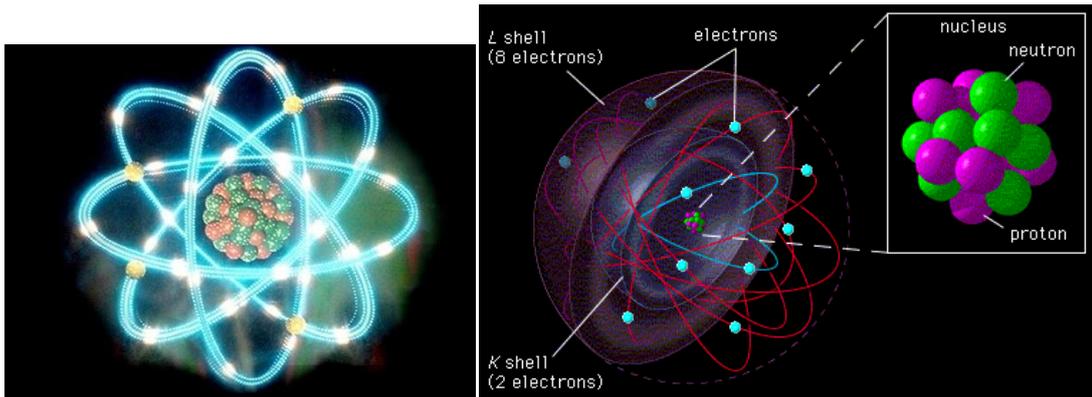


Figura 16: Imagens da estrutura do átomo, mostrando os prótons e os nêutrons.

## ANEXO D

### IMAGENS UTILIZADAS NO TERCEIRO ENCONTRO



Figura 01: Vista aérea das Usinas Nucleares em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, Brasil.



Figura 02: Usinas Nucleares Angra 1 (ao fundo) e Angra 2



Figura 03: Localização das reservas de urânio no Brasil.

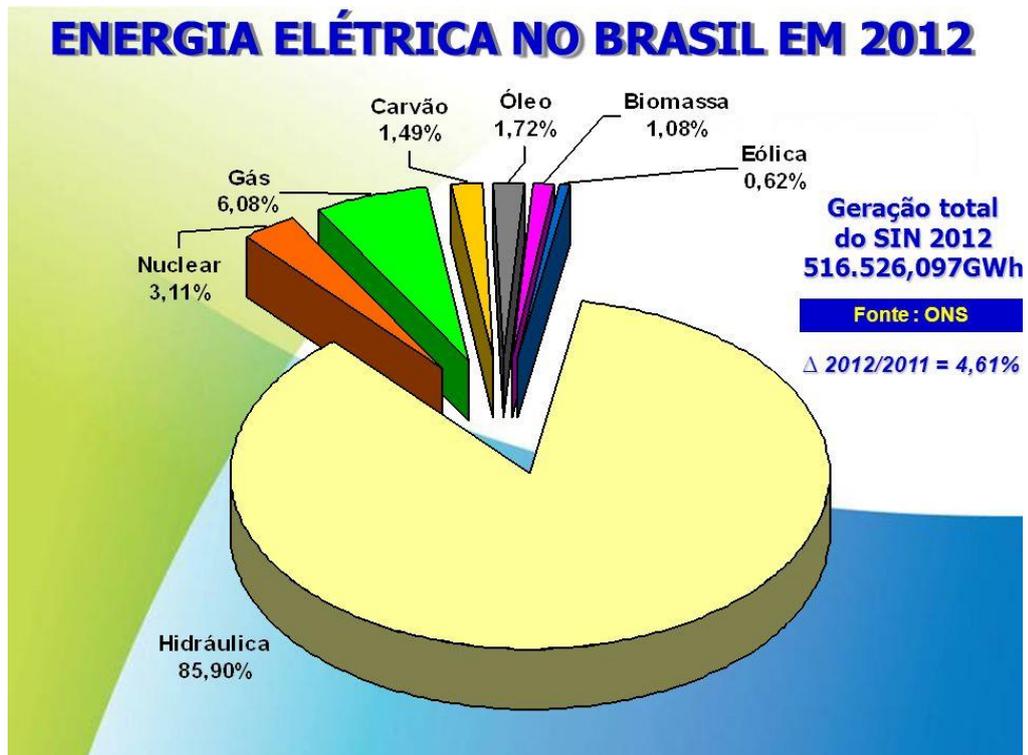


Figura 04: Matriz energética brasileira em 2012.



Figura 05: Charge retratando a tensão gerada durante a Guerra Fria, conhecida como Crise dos Mísseis.



Figura 06: Jornal de circulação nacional trazendo como manchete notícias vinculadas à Crise dos Mísseis.