



ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA NO ENSINO DE FISSÃO E FUSÃO NUCLEAR PARA O ENSINO MÉDIO.

Suami João Martins Ramos

Produto da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Fluminense – Instituto de Ciências Exatas 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.

Orientador:

Professor Dr. Ladário da Silva

Volta Redonda

Novembro 2015

SUMÁRIO

SUMÁRIO	2
RESUMO	3
1. DESCRIÇÃO DAS TAREFAS A SEREM PROPOSTAS AOS ALUNOS.	4
1.1 OBJETIVOS.....	4
2. DESCRIÇÃO DOS ENCONTROS.	7
2.1. PRIMEIRO ENCONTRO: Estrutura do Trabalho e Questão Disparadora	8
2.2. SEGUNDO ENCONTRO: Projeção do Documentário.....	9
2.3 TERCEIRO ENCONTRO: Aula Conceitual.	10
2.4. QUARTO ENCONTRO: Experimentos.....	10
2.4.1 Simulação de Reação em Cadeia (experimento das ratoeiras).....	11
2.4.2 Experimento de simulação a ação da força nuclear forte (experimento dos Imãs).....	14
2.5. QUINTO ENCONTRO.....	17
O uso do Simulador Phet:.....	17
2.6 SEXTO ENCONTRO: Apresentação dos Trabalhos.	24
2.7 SÉTIMO ENCONTRO: Apresentação dos Trabalhos e Fechamento	25
CAPÍTULO 3.....	26
FISSÃO E FUSÃO NUCLEAR NO ENSINO MÉDIO.	27
3.1 FISSÃO NUCLEAR.....	27
3.1.1 Interações Nucleares:	27
3.1.2 Fissão Nuclear.....	28
3.1.3 Reatores Nucleares de Fissão:	33
3.2 FUSÃO NUCLEAR	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ENDEREÇOS ELETRÔNICOS UTILIZADOS NESTA PESQUISA	45

RESUMO

Este documento descreve uma sequência de ações didáticas visando o ensino do tema Fusão e Fissão Nuclear no Ensino Médio. Ele pode ser usado no quarto bimestre do segundo ano do Ensino Médio, de acordo com o atual currículo da Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro. A importância deste tema é marcante, haja vista as pesquisas para o desenvolvimento da Fissão Nuclear terem sido um marco na história da humanidade, pois culminaram com o lançamento das bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki, inaugurando, assim uma nova Era, a Era Nuclear. A Fusão Nuclear, por sua vez, é tema de pesquisas atuais devido, especialmente, ao seu potencial de produção de energia e também, em última análise, o grande responsável pela existência e manutenção da vida em nosso planeta. Para o estudo deste importante tema da Física propomos a abordagem que preconiza o uso da Alfabetização Científica (AC). Dentro dessa proposta mesclamos aulas mais tradicionais, quase transmissivas, com explicações na lousa e aulas com experimentos em sala de aula e também o uso de programa de computador que usam simulações. Incluímos nessa proposta discussões acerca dos aspectos éticos e políticos relativos a estas pesquisas, que tiveram seu ápice durante a Segunda Guerra Mundial, e propomos um debate cujo tema provocava a discussão entre as relações entre Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente. Com o uso da abordagem proposta pela AC, queremos colaborar para que os estudantes, além de consolidarem os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear, tenham mais uma oportunidade de, através de seus estudos, se tornarem, cidadãos mais críticos, conscientes e participativos na sociedade na qual vivemos.

1. DESCRIÇÃO DAS TAREFAS A SEREM PROPOSTAS AOS ALUNOS.

1.1 OBJETIVOS

Uma das estratégias do uso da abordagem Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA)¹, que é um dos eixos (SASSERON, 2011) da Alfabetização Científica, é usar um tema polêmico, capaz de fomentar uma discussão como elemento disparador. Desta forma, após analisarmos uma questão que pudesse estar relacionada com um fato histórico de grande relevância e que envolva juntamente conceitos físicos a serem estudados e questões éticas, sociais, históricas, filosóficas e ambientais que podem e devem ser amplamente discutidas para que possamos contribuir para a formação do cidadão crítico e consciente, conforme orientação contida nos, Parâmetros Curriculares Nacionais, (PCN). Escolhemos a seguinte questão que, em nosso entendimento, é bastante provocadora:

- Você acha que a pesquisa sobre o desenvolvimento da Energia Nuclear ocorrida durante a 1ª metade do século XX, foi prejudicial para a humanidade, ou não?

Evidentemente sabemos que o professor não ignora o fato de que as pesquisas sobre energia nuclear realizadas na metade do século XX, foram relacionadas com o intuito da construção da bomba atômica, entretanto, evitamos mencionar diretamente o termo “bomba atômica” uma vez que é do conhecimento de todos que ele por si já traz consigo a idéia de algo extremamente prejudicial, e este fato, certamente traria, antecipadamente, um julgamento negativo a respeito das pesquisas.

Com o objetivo da realização das tarefas, os alunos foram divididos em seis equipes as quais pesquisaram temas previamente selecionados a fim de responder a questão proposta. Na divisão das equipes procuramos manter um equilíbrio entre as concepções a favor e contra os estudos de desenvolvimento

¹ Os outros eixos são: 1 – O conceito Física juntamente com o formalismo matemático, com equações e gráficos pertinentes ao conteúdo. 2 – As conseqüências e razões histórico-filosóficas decorrentes do desenvolvimento destes conceitos.

da Fissão e Fusão nuclear para que os alunos obtivessem subsídios para a discussão desses assuntos e para que possam analisar a questão proposta. Os alunos buscaram conhecer, também, personalidades, que muito contribuíram para o desenvolvimento das pesquisas nucleares ou que tiveram uma postura ética exemplar perante o momento crítico no qual se desenvolveram as pesquisas estudadas ou que mesmo, sem ter uma conduta irrepreensível, tiveram uma atuação no campo da Física, ou da Política ou nas decisões militares que envolveram o momento histórico ou ainda que foram grandes colaboradores para a humanidade no aproveitamento e aplicação dos conhecimentos adquiridos e acumulados nesta área de estudo.

Os alunos puderam fazer um contra ponto entre personalidades tais como Robert Oppenheimer, que, sem realizarmos juízo de valor, foi o chefe dos cientistas nas pesquisas do Projeto Manhattan, o responsável geral foi o general Leslie Richard Groves. (BODANIS, 2001 p.154) Projeto este, destinado à construção da bomba atômica. Cientista de vasta cultura e que mesmo suspeitando do risco de incendiar a atmosfera terrestre com a detonação da bomba, pois, os cientistas da época ventilavam esta possibilidade em função das incertezas dos estudos que possuíam, optou pela continuidade como chefe do projeto, e realização de posterior teste nuclear. (BBC, 2002).

Por outro lado puderam analisar a vida de Ettore Majorana, cientista igualmente brilhante, para alguns, um gênio do quilate de poucos que viveram em nosso planeta, e que, ao que tudo indica, ao perceber que as pesquisas, sobre Energia Nuclear, caminhavam para a construção de um artefato tremendamente destruidor, a bomba atômica, preferiu desaparecer, abrindo mão de uma carreira brilhante, e não participar de tais pesquisas.

Puderam comparar, também, Werner Heisenberg e César Lattes, cientistas brilhantes e cidadãos imensamente patriotas vivendo situações em contextos diferentes, mas que demonstraram a sua total entrega para o que acreditavam ser o melhor para o país em que cada um viveu. Heisenberg defendendo uma nação que havia descambado para um posicionamento que a história mostrou lamentável, e Lattes cientista de um país periférico sofrendo todas as discriminações que um cidadão do então chamado Terceiro Mundo

sofre quando vive em países do chamado Primeiro Mundo. Por duas vezes, injustamente, preterido a ser laureado com o Prêmio Nobel, e em certas ocasiões perseguido pela política de seu próprio país, mesmo assim, participando e sendo pioneiro na fundação dos principais institutos de pesquisas até hoje existentes.

Puderam, também, realizar um contraponto entre Henry Truman e Albert Einstein. Truman, vice-presidente do popularíssimo Franklin Delano Roosevelt, o primeiro e único presidente dos Estados Unidos da América a exercer mais de dois mandatos. Truman, que ignorava o Projeto Manhattan até a sua posse, teve que tomar a difícil decisão de lançar as bombas atômicas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, registrando, assim, o seu nome na história de uma forma, no mínimo, muito controversa. E Einstein, o cientista mais famoso na época, pacifista assumido e que também se viu numa situação de ter que tomar um posicionamento drástico e assinar uma carta, proposta por seu amigo Leo Szilard, carta esta que disparou a execução do Projeto Manhattan. (BBC, 2002).

No fim do processo os alunos apresentaram em grupo os resultados de suas pesquisas e, num segundo momento, participaram de um debate, a fim de discutir a pergunta provocadora. A cada encontro o professor-pesquisador anotava suas impressões a cerca do desenvolvimento dos grupos e demais questões que achava pertinentes e relevantes para a discussão.

Sugeriremos também, que os alunos pesquisem outras personalidades, à livre escolha, relacionadas com o tema. Os temas e personalidades propostos são os seguintes:

1. Projeto Manhattan e Robert Oppenheimer.
2. Matriz Energética Brasileira e Werner Heisenberg.
3. Primórdios dos Institutos de Ciências no Brasil e César Lattes.
4. A Corrida para o Domínio da Tecnologia da Energia Nuclear no Brasil e no Mundo e Henry Truman.

5. Equipamentos Médicos que Dependem de Reações Nucleares e Ettore Majorana.

6. Energia Nuclear e Meio-Ambiente e Albert Einstein.

Os alunos realizaram pesquisas, orientados pelo professor- pesquisador sobre cada tema descrito acima, apresentaram estas pesquisas por escrito e em exposição oral quando foi realizado um debate em sala de aula apresentando e expondo suas pesquisas.

O motivo das escolhas dos temas foram os descritos abaixo e foram organizados de uma forma que esperamos que os alunos do Ensino Médio tivessem perfeitas condições de incorporar em suas bagagens culturais, uma vez que os construtos necessários para a ancoragem de tais conceitos, que, acreditamos, já fazem parte de seus patrimônios culturais.

Nos itens 5.2 e seguintes de nossa Dissertação (RAMOS, 2015) fazemos algumas sugestões de discussões e conteúdos que o professor poderá trabalhar com cada um dos temas propostos.

Caso o professor queira, no capítulo dois (2) de nossa Dissertação (RAMOS, 2015) apresentamos o embasamento pedagógico do projeto em tela.

2. DESCRIÇÃO DOS ENCONTROS.

Esta proposta foi idealizada para ser realizada em sete (7) encontros, ou seja, sete aulas duplas. Ela contempla todo o conteúdo programático determinado para ser ministrado no quarto bimestre, levando em conta o Currículo Mínimo do Estado do Rio de Janeiro. Caso o professor queira aplicar a presente proposta não trabalhe na Rede do Estado do Rio de Janeiro e não disponha desta quantidade de aulas, poderá, reduzir a quantidade de tempos, como por exemplo, sugerindo que os alunos assistam os documentários em casa e ou também reduzindo a quantidade de equipes a serem distribuídas. Segue agora a descrição dos encontros:

2.1. PRIMEIRO ENCONTRO.

Neste primeiro encontro, solicitamos que os alunos respondam, de forma espontânea, a questão provocadora do trabalho, que é:

Você acha que a pesquisa sobre o desenvolvimento da Energia Nuclear ocorrida durante a 1ª metade do século XX, foi prejudicial para a humanidade, ou não?

Estas questões objetivaram verificar o quanto seria significativo para eles os conceitos a serem estudados nas aulas seguintes.

Após esta primeira etapa apresentamos aos alunos a estrutura do trabalho e como o mesmo deverá ser entregue e apresentado ao professor e aos colegas.

Visando uma preparação para futuros trabalhos, inclusive em nível de graduação, determinamos que eles sejam apresentados seguindo um determinado critério. Não tão rígido como exigem as normas técnicas brasileiras, mas dentro de uma lógica de bom senso e boa visualização. Estas exigências são importantes também porque o professor poderá facilmente verificar se o aluno ao invés de pesquisar, simplesmente copiou e colou. As sugestões são:

- Fonte arial 12.

- parágrafo Justificado.

- Folha A4.

Recomendamos, também, que os alunos realizassem as suas pesquisas somente em endereços eletrônicos oficiais, ou de universidades ou ainda de instituições reconhecidamente idôneas.

Neste primeiro encontro, determinamos, também, quais serão as tarefas de cada equipe, deixando, entretanto, que os alunos nos apresentem, no próximo encontro, a listagem com os componentes de cada equipe. Os alunos escolhem, também, livremente os temas que querem pesquisar, caso haja coincidência de escolha, fazemos um sorteio no segundo encontro.

Sugerimos, também, a leitura de alguns livros: “ $E = m c^2$ uma biografia da equação mais famosa do mundo e o que ela significa” de David Bodanis e “Oppenheimer e a Bomba Atômica em 90 minutos”, de Paul Strathern. Pois são livros que oferecem as primeiras noções do início das pesquisas nucleares e o nascimento do Projeto Manhattan. O primeiro deles é sugerido por questões de aprofundamento, mas o segundo, que é um livro de bolso, no momento atual é mais condizente com o perfil de nossos alunos.

2.2. SEGUNDO ENCONTRO.

Neste 2º encontro apresentamos o documentário: Einstein e sua equação de Vida e Morte, (BBC, 2005).

É um documentário muito rico que mostra como os cientistas que vivenciaram as perseguições nazistas ocorridas na Alemanha da década de trinta do século XX, perceberam o risco dos cientistas nazistas, comandados por Werner Heisenberg, construir a bomba atômica, o que seria evidentemente catastrófico para os aliados e convenceram Einstein, um pacifista, a assinar uma carta, elaborada por Leo Slard a fim de convencer ao presidente dos Estados Unidos da América, Delano Rosselvet, a iniciar as pesquisas para a construção da bomba atômica, o que foi realizado através do Projeto Manhattan.

Além desta interessante e já polêmica situação histórica o documentário descreve, de forma bastante didática, os processos de fissão e fusão nucleares através de animações e simulações muito claras.

Então, através deste documentário, já podemos iniciar as primeiras reflexões a respeito dos fatos que provocaram a aceleração dos estudos mundiais sobre os processos de fissão nuclear e podemos, também mostrar os primeiros exemplos e animações sobre os processos de fissão e fusão nucleares.

O professor poderá, também sugerir que os alunos vejam em casa o documentário, Oppenheimer e a bomba atômica. (BBC, 2002).

2.3 TERCEIRO ENCONTRO.

Aula conceitual sobre os conceitos de Fissão e Fusão Nucleares.

Utilizando as orientações contidas nos parâmetros curriculares da Secretaria Estadual do Rio de Janeiro, (RIO DE JANEIRO, 2012) e apoiados em textos de livros didáticos aprovados pelo Ministério da Educação e Cultura, (MEC) trabalhamos os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear. A fim de ilustrarmos a aula projetamos as cenas dos processos de Fissão e Fusão vistas no documentário analisado no segundo encontro. No capítulo 3 apresentamos uma sugestão de conteúdo que pode ser trabalhada de acordo com o nível cognitivo de cada turma. O conteúdo apresentado extrapola o nível de todos os livros aprovados pelo MEC, para o uso no Ensino Médio, mas sem o formalismo matemático encontrado em alguns livros de graduação. Fica a cargo do professor até que grau de profundidade trabalhará com seus alunos.

2.4. QUARTO ENCONTRO.

Realização dos experimentos da simulação de reação em cadeia, (experimento da “Ratoeira”) e de ação da força nuclear forte, (dos Imãs).

2.4.1 Simulação de Reação em Cadeia (experimento das ratoeiras).

No experimento das Ratoeiras, que adaptamos de um vídeo que pode ser encontrado no endereço: <https://www.youtube.com/watch?v=F1u3YFNe5ls>, simulamos uma reação em cadeia muito útil para a visualização. Estaremos, então, concretizando de forma representativa as reações em cadeia que os alunos já haviam observado no documentário analisado no Segundo Encontro e comentado pelo professor na exposição dos conceitos no Terceiro Encontro e minutos antes, neste Quarto Encontro, quando, recomendamos que se faça uma revisão rápida dos conceitos.

O experimento da Ratoeira consiste na confecção de uma caixa de acrílico com as dimensões de 40 cm de largura por 80cm de comprimento e 25 cm de profundidade, vide figuras 2.1 e 2.2. Nesta caixa são colocadas várias ratoeiras de menores dimensões encontradas no mercado, em nosso caso adquirimos ratoeiras de 9,0 cm x 5,0 cm, nelas prendemos bolas de pingue-pongue (tênis de mesa). Esta caixa possui uma tampa através da qual lançamos outra bola com diâmetro aproximadamente igual ao das bolas de pingue-pongue, mas, preferencialmente, de massa maior. Nesta simulação a bola a ser lançada representa o nêutron e as ratoeiras com as bolas de pingue-pongue representam os núcleos de Urânio a serem fissurados, quando a bola lançada atinge a primeira ratoeira e desprende a primeira bola de pingue-pongue, que representa o nêutron liberado provoca a reação em cadeia, vide endereço eletrônico sugerido acima.



Figura 2.1 – Caixa de acrílico com ratoeiras e bolas de pingue-pongue.
Para experimento de simulação de Reação em Cadeia.



Figura 2.2 – Experimento de Simulação de Reação em Cadeia
Detalhe da Tampa

Antes do lançamento da bola representativa do nêutron que inicia a reação em cadeia o professor poderá explorar os conceitos de Energia Potencial Gravitacional e Energia Cinética estudados nos bimestres anteriores. Poderá questionar os alunos se haverá alguma consequência caso o professor lance a bola que representa o nêutron a uma altura maior. Se a bola/nêutron possuir uma massa maior e se ela for lançada ou largada a partir de uma determinada altura; explorando, assim os conceitos energia potencial gravitacional e de transformação de energia potencial gravitacional em energia cinética.

No preparo deste experimento o professor poderá ser auxiliado pelos alunos, desde que oriente para que o cuidado para a montagem das ratoeiras seja realizado com a máxima cautela, o que proporciona um sentimento de realização e camaradagem importante para o bom relacionamento aluno-professor. Vide figura 2.3.



Figura 2.3 – Montagem do experimento de simulação de Reação em Cadeia.

O experimento da Ratoeira é bastante rico, tanto para simular uma reação em cadeia, como para promover a discussão sobre outros tipos de transformação de energia, conforme sugerimos acima. O professor poderá se aproveitar de um fato que aparentemente seria uma desvantagem, que ocorreu

conosco, pois, ao realizar o experimento nas últimas turmas a quantidade de ratoeiras que disparavam não era a mesma ao repetirmos os experimentos. Assim aproveitamos para discutir sobre aleatoriedade e a questão dos modelos, ou seja, que a Física trabalha com modelos e que muitas das vezes os experimentos vistos como isolados não traduzem exatamente o que ocorre na natureza. É necessário encarar a repetição dos mesmos e o caráter aleatório, pois há dependência do nível de aproximação entre o verdadeiro fenômeno e o modelo que vigora no atual estágio de desenvolvimento teórico da lei física que se analisa.

Estes experimentos normalmente atraem a atenção dos alunos muito mais do que as aulas expositivas. Se faz necessário tirar o maior proveito possível desta situação. Vide figura 2.4.



Figura 2.4 – Observação à realização do experimento.

2.4.2 Experimento de simulação a ação da força nuclear forte (experimento dos Irmãos).

Neste experimento, conforme descrito acima, simulamos a ação da força nuclear forte. É realizado da seguinte maneira:

Preparação:

1 – Colamos sobre uma capa de guardar documentos um lado de um feixe velcro.

2 – Deixamos a outra face sem o velcro.

3 – Colocamos em cada um destes “saquinhos” um ímã razoavelmente forte. Vide figuras 2.5, 2.6 e 2.7.

Realização do experimento:

Ao aproximarmos os “saquinhos” com os lados contrários dos ímãs diretamente direcionados, verificamos que eles se repelem. Nesta situação, a força magnética está representando a força elétrica, repulsão coulombiana. Os “saquinhos”, evidentemente, representam os prótons. Ao realizar esta etapa coloque o lado do porta documentos para baixo a fim de minimizar o efeito do atrito. É conveniente também que o professor providencie uma placa de vidro para servir de base para os “saquinhos” pelo mesmo motivo descrito acima.

Prendemos os “saquinhos” através do velcro, que se manterão unidos. Neste caso a força de união entre as partes do velcro representa a força nuclear forte, que só age a pequenas distâncias.

Neste experimento, que poderá ser realizada em grupos de alunos, o professor naturalmente fará as comparações de ordem de grandeza entre as distâncias envolvidas.



Figura 2.5 – Foto do porta documentos



Figura 2.6 – Foto do porta documento revestido com velcro



Figura 2.7 – Foto do porta documentos com o imã

2.5. QUINTO ENCONTRO.

Neste Encontro utilizamos o Simulador PHET. Que é encontrado no endereço: ([HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)).

Simuladores educacionais são programas de computador que reproduzem virtualmente experimentos reais. O Phet é um deles. As vantagens e desvantagens do uso de simuladores podem ser visto no item 5.1.5 da dissertação do autor. (RAMOS, 2015).

O uso do Simulador Phet:

A proposta que apresentaremos, e que utilizamos em nossa prática, é planejada para ser trabalhada com os alunos divididos em grupos de no mínimo três e máximo de cinco, mas compreendendo que este número pode se estender, de acordo com a realidade de cada escola. Sugerimos o uso desta prática após ter sido estudado, em sala de aula, o conceito de fissão nuclear.

É muito importante que o professor realize, se possível, o download do Simulador Phet que ele usará, pois este simulador opera “on line”, e como sabemos, não é raro o sinal da rede estar indisponível no momento que vamos utilizá-lo. Ou na situação de não haver sinal de internet na escola na qual o professor trabalha. Com o autor ocorreu fato semelhante. No dia da

apresentação de uma das turmas houve um impedimento quanto ao uso do laboratório de informática. Então o experimento foi realizado pelo professor, sob a observação dos alunos. Não é a forma ideal de se apresentar o experimento, o ideal é que os alunos manipulem o programa, mas é o que se pode realizar na falta do laboratório de informática.

A seguir apresentamos uma proposta das muitas que o professor poderá adotar para trabalhar com este simulador.

Os passos à serem propostos aos alunos são os seguintes:

1 – Entrar no módulo Reação em Cadeia:

1.1 Selecionar apenas um núcleo.

Acionar o botão disparador.

Verificar o resultado.

Nesta primeira questão o objetivo é que o aluno veja, sem nenhuma obstrução, o fenômeno, virtualizado, como em todo o experimento, da fissão nuclear.

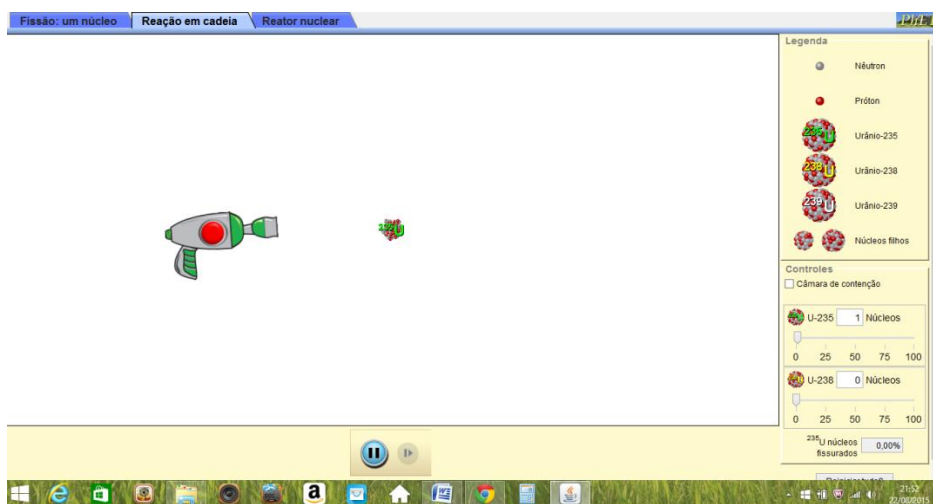


Figura 2.8 – Lançamento do “nêutron” com um núcleo.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

1.2 Atirar com somente 10 núcleos.

A intenção nesta questão é que o aluno perceba a dificuldade tecnológica necessária para que se consiga adequar o equipamento para que o nêutron atinja o primeiro núcleo para que provoque, assim, a reação em cadeia. Esta dificuldade será mais perceptível se o aluno errar o primeiro ou os primeiros tiros para tal o professor deverá instruir os alunos que propositalmente errem o alvo para que assim possa realizar os comentários pertinentes.

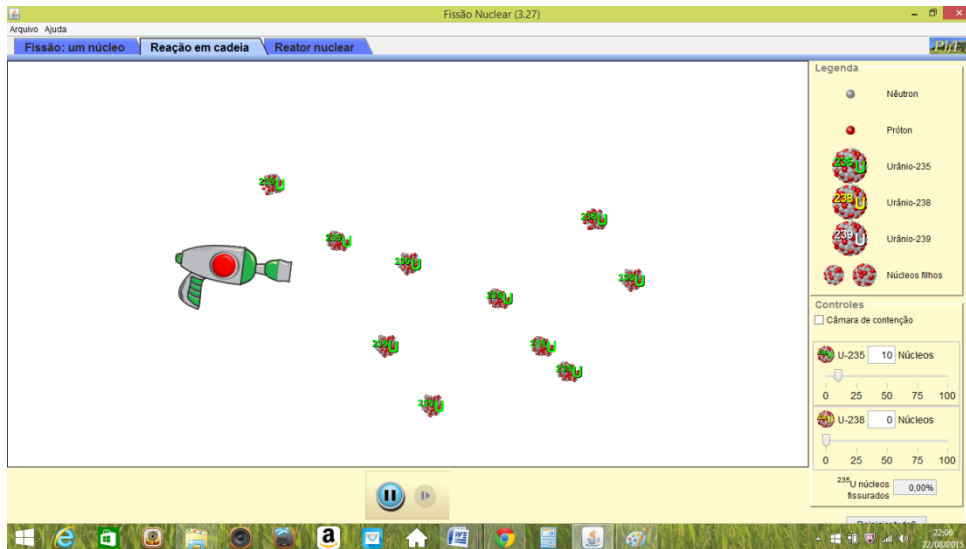


Figura 2.9 – Lançamento do “nêutron” com dez (10) núcleos.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

1.3 Aumentar o número de núcleos para, por exemplo, 50.

Com esta grande quantidade de núcleos o aluno facilmente perceberá a reação em cadeia.

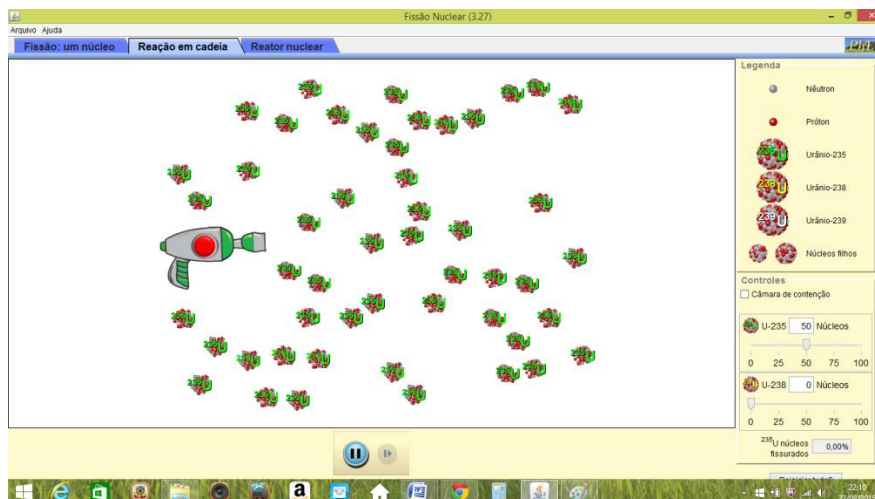


Figura 2.10 – Lançamento do “nêutron” com cinquenta (50) núcleos.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

1.4 Trocar do Urânio 235 para o 238.

1.5 Atirar com somente 1 núcleo.

Procura-se neste item que o aluno perceba que com o Urânio 238 não acontece à fissão, ilustrando, assim que, a reação depende do tipo de isótopo que se esta trabalhando, conforme já havia sido comentado na sala de aula.

A partir da etapa seguinte é interessante que os alunos repitam algumas vezes cada tarefa, uma vez que, cada vez que se reinicia os núcleos eles são colocados na tela com uma disposição diferente, o que possibilita observações diferentes, enriquecendo, assim, a aula. O professor deverá orientar para que os alunos disparem ora nos núcleos mais à frente, ora nos núcleos mais afastados.

1.6 Solicitar que se coloquem 10 núcleos de U-238.

Aqui esperamos que o aluno perceba o óbvio, que mesmo com uma quantidade maior de núcleos não haverá reação em cadeia, já que não acontece a fissão nuclear com o urânio 238.

Reiniciar tudo

1.7 Colocar, novamente, 10 núcleos de U-235

Disparar aleatoriamente.

Nesta etapa esperamos que o aluno perceba que só acontece a fissão quando o nêutron colide com os núcleos do urânio 235 e que nada acontece quando os núcleos de kriptônio ou bário se aproximam dos núcleos de urânio 235.

1.8 Solicitar que coloquem 50 núcleos.

1.9 Disparar no núcleo logo à frente.

1.10 Novamente com 50 núcleos Disparar no núcleo do meio.

Nesta etapa o aluno deverá perceber a diferença do direcionamento do disparo do núcleo à ser atingido em primeiro lugar a fim de que se obtenha uma melhor eficiência na reação em cadeia.

2 – Solicitar ativação da câmara de contenção.

2.1 Solicitar que coloquem 20 núcleos e disparem.

Nesta etapa o aluno perceberá que os núcleos quando contidos na câmara de contenção proporcionam uma eficiência muito maior, na reação em cadeia, do que quando soltos.

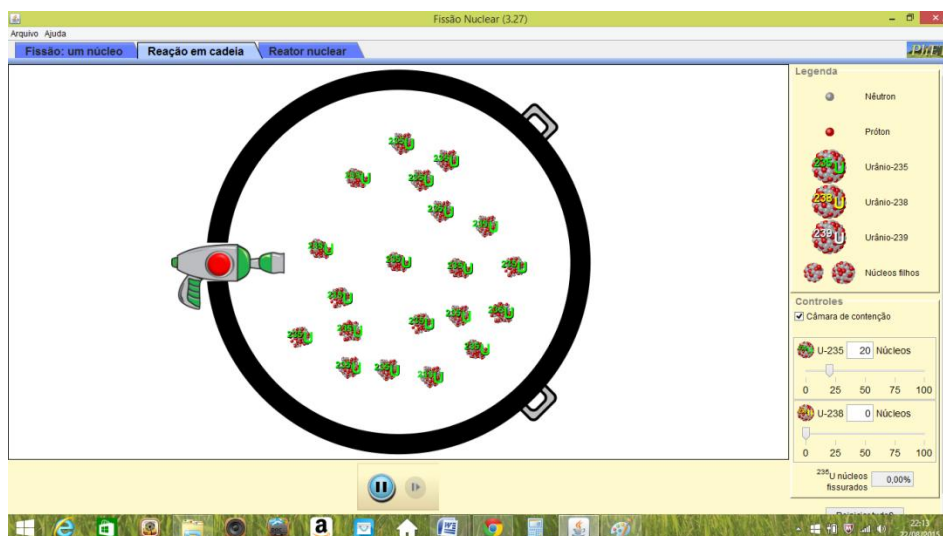


Figura 2.11 – Lançamento do “nêutron” com vinte (20) núcleos contidos na câmara de contenção.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

2.2 Solicitar que os alunos retornem ao módulo sem Câmara de contenção e novamente coloquem 20 núcleos e comparem os resultados com e sem Câmara.

2.3 Permitir que os alunos “brinquem” com valores diferentes de núcleos para que percebam a eficiência da Câmara de contenção.

3 – Solicitar que os alunos entrem no módulo Reator Nuclear.

3.1 Orientar para que os alunos, após disparar os nêutrons movimentem o controlador aleatoriamente e observem a temperatura e os gráficos de energia, simulando, então as operações que são realizadas nas usinas nucleares, onde existe um constante controle de temperatura e fluxo de energia, entre outras variáveis necessárias de monitoramento, visualizando, assim, de modo virtual, o que também já havia sido comentado em sala de aula.

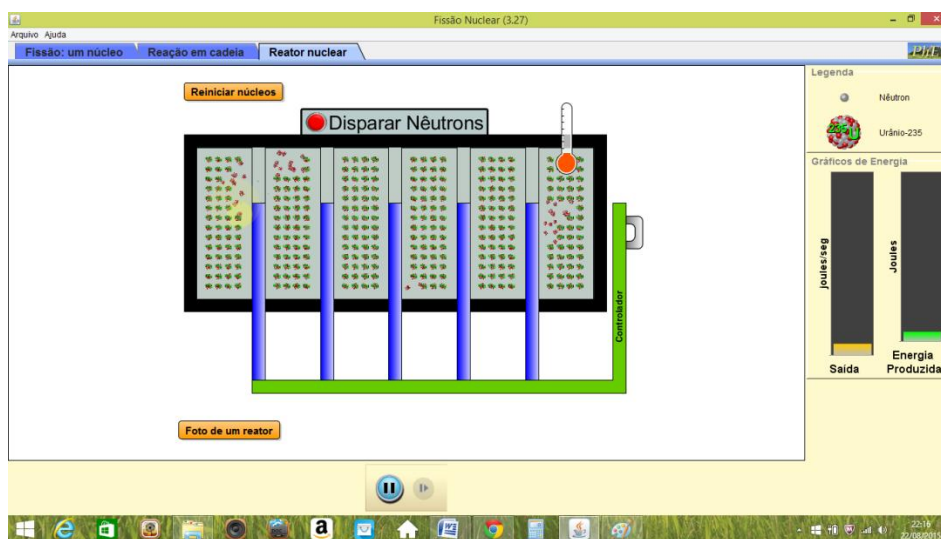


Figura 2.12 – Simulação das barras de controle.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

3.2 Permitir que os alunos “brinquem” com o posicionamento dos controladores.

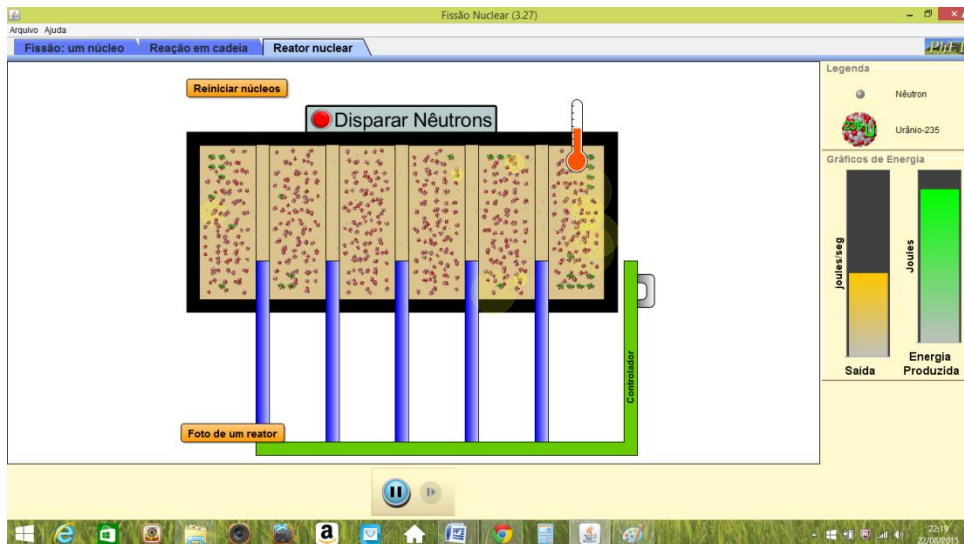


Figura 2.13 – Simulação das barras de controle mostrando uma quantidade significativa de colisões nucleares. Em destaque a direita os gráficos de energia.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

4 – Solicitar que os alunos cliquem “na foto de um reator”, para que assim possam verificar a foto real do interior do núcleo de um reator.



Figura 2.14 – Foto do interior do Reator.

Figura capturada pelo autor no endereço <[HTTPS://phet.colorado.edu/pt_br](https://phet.colorado.edu/pt_br)>. Acesso em 27 ag. 2015.

Finaliza-se, assim o trabalho laboratorial deixando para a próxima aula um reforço conceitual do fenômeno da fissão nuclear.

Este experimento é de grande valia para a aprendizagem pois os alunos, normalmente, não comparecem com freqüência ao laboratório de informática, e ao fazê-lo desperta nos mesmos uma sensação de realização de execução de trabalho que é facilmente detectada pelo professor. É interessante destacar que o autor ao planejar as tarefas a serem executadas não havia percebido que se poderia “fabricar” a bomba atômica através do simulador, e os alunos o fizeram durante a aula e mostraram ao professor.

2.6 SEXTO ENCONTRO.

Apresentação e discussão dos trabalhos por parte dos alunos:

Neste encontro os alunos apresentaram os trabalhos que realizaram.

A seqüência ideal para a apresentação dos trabalhos é que se inicie com o Projeto Manhattan, por ter sido o fato disparador dos estudos de Fissão Nuclear; depois, não vemos necessidade de hierarquização na seqüência das apresentações uma vez que todos os outros sub-temas são conseqüências do Projeto Manhattan.

Neste encontro é necessário que o professor, que embora já tenha lido os trabalhos previamente entregues, se mantenha atento às observações a serem realizadas pelos alunos, pois, os conceitos e posicionamentos nem sempre estão de acordo com os atuais níveis de entendimento da ciência, não obstante a necessidade do professor se manter o mais neutro possível intervindo apenas nos casos em que haja flagrante descompasso com os conceitos estudados.

Como a apresentação dos trabalhos é realizada em equipe, geralmente há um ou mais alunos que possuem uma maior facilidade em falar publicamente, mas incrivelmente, às vezes acontece que, nenhum aluno da equipe possui desenvoltura nesta habilidade, neste caso o professor deverá se comportar como um facilitador, a fim de que a compreensão dos demais alunos em relação ao contexto, ao todo do trabalho não fique prejudicada.

Este tipo de apresentação é rico também para que o professor possa observar as aptidões que alguns alunos apresentam para esta ou aquela profissão e que eles mesmos não percebem e que o professor poderá, em outra oportunidade conversar com o aluno e alertá-lo e incentivá-lo quanto esta ou aquela habilidade importante para tal ou qual profissão.

Nosso trabalho foi aplicado em turmas do curso noturno. Em outros trabalhos realizados com esta mesma metodologia aplicados em turmas de primeiro ano fazíamos debates entre as equipes, mas observamos que os alunos faziam “jogo de compadre”, ou seja, as equipes combinavam as perguntas que seriam realizadas. Por este motivo optamos pelo formato de exposição na apresentação. Entretanto em experiências com turmas do matutino, em anos anteriores havia debates calorosos. Então sugiro ao leitor que dependendo de sua clientela possa realizar a apresentação no formato de debate.

2.7 SÉTIMO ENCONTRO

Continuação das apresentações, fechamento dos trabalhos e avaliação.

Difícilmente as seis equipes terão tempo de apresentar seus trabalhos no sexto encontro, por este fato reservamos o sétimo encontro para finalização das apresentações e avaliação. Neste encontro o professor fará também o fechamento do projeto.

No fechamento dos trabalhos o professor terá a oportunidade de conectar os assuntos que os alunos não perceberam durante as pesquisas e também no decorrer das apresentações.

Na avaliação propomos que, seja realizada em duas etapas: na primeira avaliamos os trabalhos, que conforme relatamos anteriormente foram entregues digitados. Avaliamos a formatação, se foram respeitados os critérios estabelecidos, fonte, parágrafo e tamanho do papel. Avaliamos também a pesquisa, quanto à objetividade e a clareza. A segunda etapa da avaliação é a apresentação dos trabalhos. Nesta fase é necessário muito cuidado, por parte

do professor, pois sabemos que alguns alunos são muito tímidos e este comportamento pode mascarar e fatalmente prejudicar a desenvoltura na apresentação dos trabalhos. É necessário, então que o professor procure deixar os alunos mais à vontade possível, incentivando-os para que possam externalizar suas idéias.

No capítulo seguinte (3), apresentamos uma proposta de conteúdo que pode ser adaptada ao nível de cada turma na qual será aplicado este projeto, caso o professor não queira ficar restrito somente ao livro texto adotado pela sua escola. O conteúdo que expomos vai além dos conteúdos contidos em todos os livros aprovados pelo MEC na escolha do livro didático do ano de 2014 (última escolha até o presente momento). Para esta proposta nos baseamos em livros de graduação sem, entretanto, entrar no formalismo matemático contido nos mesmos. O conteúdo que propomos é cabível para o Ensino Médio.

CAPÍTULO 3

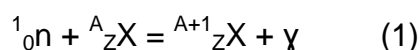
FISSÃO E FUSÃO NUCLEAR NO ENSINO MÉDIO.

3.1 FISSÃO NUCLEAR

3.1.1 Interações Nucleares:

Para melhor compreendermos o processo de fissão nuclear e o funcionamento dos reatores nucleares, quanto a sua física, analisaremos, primeiramente, as interações que ocorrem entre os nêutrons e os núcleos. Neste capítulo nos restringiremos a conhecimentos possíveis de serem compreendidos por alunos do Ensino Médio.

Os nêutrons, pelo fato de não terem carga elétrica, não sofrem interações coulombianas. Entretanto, os nêutrons livres, ao movimentarem no interior da matéria provocam reações nucleares. Experimentalmente foi verificado que quanto menor a energia do nêutron maior é a probabilidade de ocorrência de interações com o núcleo. Um nêutron rápido (energia maior que 1 MeV^2), no interior da matéria sofre muitas colisões com o núcleo. Em cada colisão ele cede energia cinética para o núcleo, até se tornar um nêutron térmico, ou seja, sua energia atinge a ordem da energia térmica kT , onde k é o constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta. Neste nível de energia é grande a probabilidade de o nêutron ser capturado por um núcleo, e quando isto ocorre, o núcleo emite um raio gama. O processo de captura do nêutron é expresso da seguinte forma:



Onde:

1_0n – Representa o nêutron que é lançado e capturado por um núcleo X.

A_ZX – O núcleo que capturou o nêutron.

² MeV, Significa Milhões de Elétron-volt. Elétron-volt (eV) é uma unidade de energia utilizada para medições em nível nuclear, e é definida como a energia cinética adquirida por um elétron ao ser submetido a uma tensão de 1 volt.

γ - O raio gama emitido pelo núcleo.

Z – Representa o número de prótons existentes num núcleo qualquer.

N – Representa o número de nêutrons existentes num núcleo qualquer.

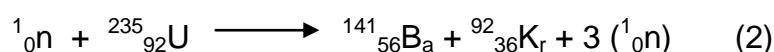
A – Representa o número de Massa ($A = Z + N$) existentes num núcleo qualquer.

Embora na equação (1) não esteja representado, o núcleo X em questão fica num estado excitado por um intervalo de tempo muito curto antes de emitir o raio gama. E em geral o núcleo resultante torna-se radioativo e decai por emissão de beta.

A taxa de captura de nêutrons depende do material que ele interage. Em alguns materiais predominam as colisões elásticas, e são denominados moderadores, pois “moderam” com muita eficiência os nêutrons de alta energia. O Boro, a grafita e a água são materiais moderadores. Os materiais que possuem muitos átomos de hidrogênio são bons moderadores, pois, o nêutron colide frontalmente com o próton do hidrogênio, produzindo uma colisão elástica, ao passo que a colisão com outros tipos de átomos ocorre de forma oblíqua, não sendo, portanto, perfeitamente elástica (SERWAY, 1992, p.223-224) e (TIPLER, 1995, p.356).

3.1.2 Fissão Nuclear

A equação básica da Fissão Nuclear é:



Onde:

1_0n – Representa o nêutron que é lançado sobre o núcleo do urânio.

${}^{235}_{92}\text{U}$ – Representa o átomo de Urânio.

${}^{141}_{56}\text{Ba}$ – Representa o átomo de um isótopo de bário que é um dos subprodutos da Fissão, ou fragmentos de fissão.

${}^{92}_{36}\text{Kr}$ – Representa o átomo de um isótopo de criptônio que é o outro subproduto da Fissão, ou fragmento de fissão.

$3 ({}^1_0\text{n})$ – Representa os três nêutrons que são liberados e que irão atingir outros núcleos de outros ${}^{235}_{92}\text{U}$, provocando, assim, uma reação em cadeia.

(SERWAY, 1992, p.225)

Em 1938 Otto Hahn e Friz Strassman observaram pela primeira vez o fenômeno da fissão nuclear; entretanto a interpretação do que ocorre no interior do átomo foi dada por Lisa Meitner e Otto Frisch através de um artigo em 1939 (BODANIS, 2001, p.116-123).

A Fissão acontece da seguinte forma: um nêutron é lançado sobre o núcleo do Urânio 235 que, naturalmente já é um elemento instável. Com a penetração deste núcleo o processo de instabilidade se acelera e o Urânio 235 transforma-se no Urânio 236, num intervalo de tempo da ordem de 10^{-12} s que para a percepção do ser humano é instantânea, e após este lapso de tempo se fragmenta em dois núcleos, (a média é de 2,5 nêutrons em cada fissão), que são os subprodutos da Fissão, e dois ou três neutros, (há possibilidade de formação de cerca de noventa núcleos subprodutos diferentes no resultado da fissão do Urânio), este produto final, possui uma quantidade de massa menor que a massa de repouso original, pois há uma liberação de energia da ordem de 200 Mega Elétrons-volts, (200 MeV), confirmando, assim, a famosa equação de Einstein:

$$E = m \cdot c^2 \quad (3)$$

Que expressa a transformação de matéria em energia (SERWAY, 1992, p.224).

Onde: E \longrightarrow é a energia.

m \longrightarrow é a massa.

c \longrightarrow é a velocidade da luz no vácuo

(NUSSENZVEIG, 1998, p.218)

Na equação básica da Fissão Nuclear (2), podemos observar que, tanto o bário como o criptônio que têm número de massa, respectivamente, igual a 141 e 92, e, portanto, maiores do que os números de massa dos isótopos mais estáveis, descritos na Tabela Periódica, e portanto são instáveis, ou seja, Radioativos, e em função desta instabilidade decairão, tanto com emissões α , que correspondem ao núcleo de Hélio, ou seja, uma partícula constituída de dois prótons e dois nêutrons, e decaem, também, como emissões β , que são, em última análise, elétrons ou pósitrons em altas velocidades, e isto acontece por longo período, por que a meia-vida de ambos é muito alta, levando séculos para que a emissão de radiação atinja níveis inofensivos para o ser humano, por isto, a necessidade de se armazenar em tambores e colocá-los nas profundezas de cavernas ou do mar, que pode causar sérios problemas no futuro, além deste exemplo há várias outras formas, no interior dos reatores nucleares, que geram resíduos radioativos (TIPLER, 1995, p.349).

O gráfico da figura 4.1, representa a probabilidade de ocorrência dos produtos da Fissão, expresso no eixo vertical, em função do número de massa "A". A possibilidade de ocorrência de uma fissão simétrica, quando os produtos da fissão possuem massas iguais, é muito baixa, da ordem de 0,01%, isto acontece quando $A = 118$. As maiores probabilidades de ocorrência da fissão ocorrem nas situações, $A \approx^3 95$ e $A \approx 140$. Nestes casos os produtos da fissão são assimétricos e são muito instáveis e por este motivo emitem, quase que instantaneamente, dois ou três nêutrons.

³ O símbolo \approx representa: aproximadamente igual a.

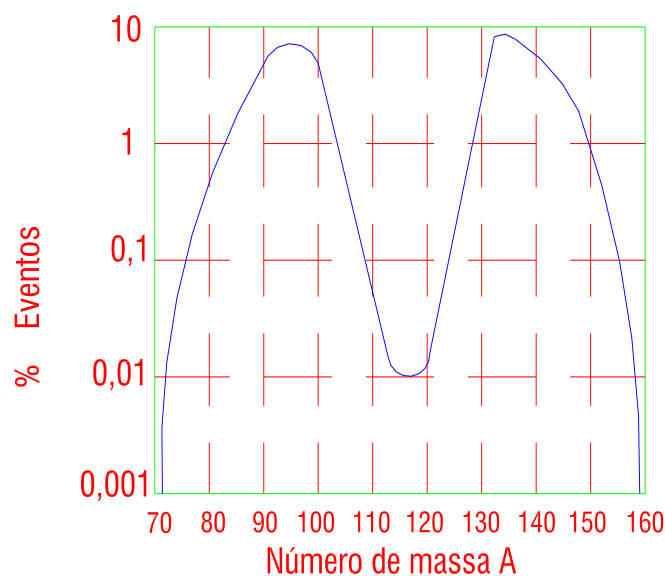


Figura 4.1 – Probabilidade de ocorrência da Fissão em função do número de massa

Adaptado de: HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. Física 4. Tradução Alexandre Carlos Tort [et. al]. 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996. p.263.

O gráfico da figura 4.2 mostra a variação da energia de ligação por núcleon de acordo com o número de massa. Podemos observar neste gráfico que, para os núcleos mais pesados, da ordem de $A = 240$, a energia de ligação por núcleon é da ordem de 7,6 MeV. Para os núcleos menos instáveis, com número de massa em torno de $A = 90$, a energia por núcleon gira em torno de 8,5 MeV.

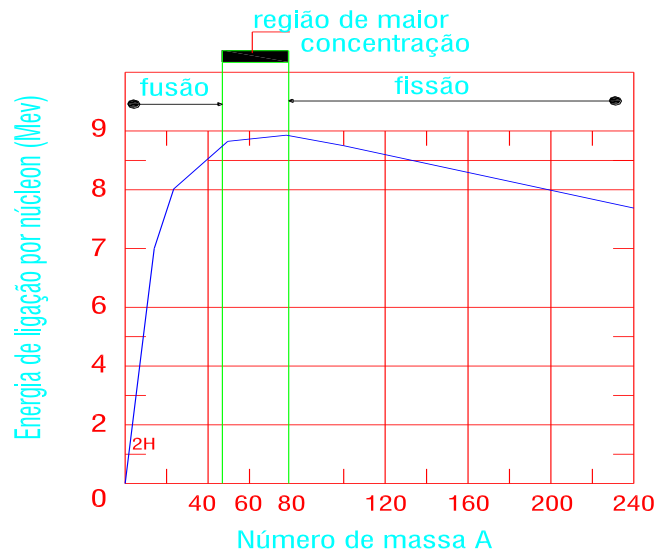


Figura 4.2 – Variação da energia de ligação por núcleon em função do número de massa.

Adaptado de: HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. Física 4. Tradução Alexandre Carlos Tort [et. al]. 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996. p.241.

O que significa que estes últimos estão mais fortemente ligados e são mais leves. Esta diferença de massa pode ser medida, também, em termos de diferença de energia. Que por núcleon temos:

$$q = 8,5 - 7,6 = 0,9 \text{ MeV}$$

Para o caso do Urânio 235, podemos fazer um cálculo aproximado da quantidade de energia (Q), liberada por núcleon, da seguinte forma:

$$Q = 235 (8,5 - 7,5)$$

$$Q = 211,5 \text{ MeV}$$

Esta quantidade, 211,5 MeV, em termos de energia química liberada num processo é muito grande. Uma molécula de octano, por exemplo, liberara, na combustão de um motor a gasolina, cerca de um milionésimo desta energia (SERWAY, 1992, p.225).

3.1.3 Reatores Nucleares de Fissão:

Como vimos anteriormente (4.1.2), a média de liberação de nêutrons por fissão é de 2,5 unidades. Estes nêutrons liberados atingem outros núcleos e de maneira sucessiva formam uma reação em cadeia. Se esta reação não for controlada, acontece uma grande explosão, com a liberação de uma quantidade de energia absurdamente alta. 1g de ^{235}U se liberada de uma só vez, equivaleria a uma explosão de 20.000.000 (2×10^7) kg de TNT⁴ (SERWAY, 1992, p.226). E isto é o que ocorre nas bombas atômicas.

Na figura 4.3 vemos a representação da fissão de um átomo do ^{235}U e a reação em cadeia que segue.

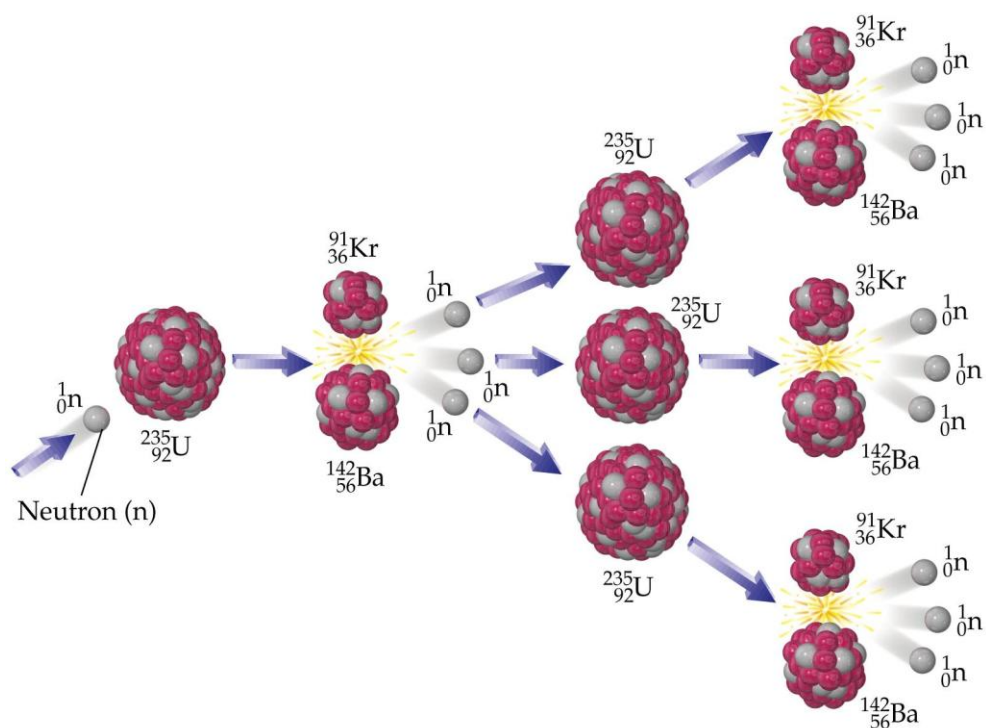


Figura 4.3 – Reação em Cadeia. Um nêutron liberado na fissão de um núcleo é capturado por outro, ocasionando sua fissão também, e assim sucessivamente.

Adaptado de: Ciência e Diversão extraído de: <<http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/09/fissao-ou-fusao-nuclear-qual-diferenca.html>>, acesso em 30/08/2015.

⁴ TNT é a sigla de um composto químico, de grande poder de explosão, denominado trinitrotolueno.

Na figura abaixo, 4.4, vemos a fotografia de réplicas das bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki, Japão, em 1945.



Figura 4.4 – Réplicas das bombas atômicas lançadas em Hiroshima, de Urânio, a Little Boy e a Fat Man (amarela), combustível Plutônio, lançada em Nagasaki.

Adaptado de: Los Alamos National Laboratory, extraído de < <https://www.lanl.gov/about/history-innovation/history-images/index.php>>, acesso em 30/08/2015

No interior dos reatores de fissão é necessário que haja o controle destas reações para que não ocorram estas explosões.

O primeiro cientista que conseguiu controlar uma reação em cadeia, que também é chamada de reação em cadeia auto-sustentada foi o italiano Enrico Fermi, em 1942 (GALETTI; LIMA, 2010, p.47).

O urânio natural possui somente cerca de 0,7% do isótopo ^{235}U , os outros 99,3% que formam a sua composição é o ^{238}U , que raramente sofre a fissão. Para que haja maior possibilidade de ocorrência da fissão é necessário que se proceda o enriquecimento do urânio. O professor Jucimar Peruzzo, em

seu livro “Física e Energia Nuclear” discorre sobre os vários percentuais de enriquecimento do urânio de acordo com a necessidade de uso.

O U é considerado fracamente enriquecido quando possui teor de ^{235}U entre 0,7% e 20%. O U com teor de ^{235}U entre 3% e 5% é geralmente utilizado em reatores de água leve, o tipo mais usado no mundo. Reatores de pesquisa requerem taxas de enriquecimento mais elevadas, geralmente de 12% a 20%. O U com teor de ^{235}U entre 1% e 2% pode ser destinado a substituir o U natural como combustível, em certos tipos de reatores que utilizam água pesada.

Quando possui uma concentração de ^{235}U superior a 20% é considerado altamente enriquecido. Essa classe de U é usada em certos tipos de reatores de nêutrons rápidos, como reatores de motorização de porta-aviões (propulsão nuclear), os quais requerem taxas de enriquecimento de 50% a 90%. Reatores com nêutrons rápidos para a produção de energia elétrica podem operar com U enriquecido à cerca de 25%. O U altamente enriquecido com um teor superior a 90% é dito de qualidade militar e é usado para a fabricação de armas nucleares. (PERUZZO, 2012, p.120-121).

Há vários processos utilizados para o enriquecimento do urânio. O que utiliza o Espectrógrafo de Massa, o processo de Jato Centrífugo, o processo por Difusão Gasosa, o processo por Ultracentrifugação, que é o mais utilizado e o processo de Separação por Laser (PERUZZO, 2012, p.122-127).

Outro fator importante para se manter uma reação em cadeia auto-sustentada é a quantidade de emissões de nêutrons por fissão. Para isto foi criado um parâmetro, que é a constante de reprodução k . Como vimos em 4.1.2 e em 4.1.3, o valor médio de k é 2,5. Para que a reação em cadeia se mantenha auto-sustentada é necessário que tenhamos $k = 1$. Nesta situação é dito que o reator está crítico. Quando k for maior que a unidade, ($k > 1$) o reator

estará supercrítico e poderá ocorrer uma reação descontrolada; superaquecendo o reator. Na situação em tivermos k menor do que a unidade, ($k < 1$) o reator estará subcrítico e a reação se extinguirá. Para manter o valor de k próximo de 1 são usadas barras de controle no núcleo do reator. Estas barras de controle geralmente são de cádmio, porque este elemento possui uma grande capacidade de absorção de nêutrons.

Vimos anteriormente, em 4.1.1, quando analisamos as interações nucleares que os nêutrons rápidos, com energia cinética maior que 1MeV, têm pouca possibilidade de provocar o fenômeno da fissão nuclear. A fim de desacelerar estes nêutrons são usados moderadores, Fermi em suas primeiras experiências utilizava tijolos de grafita (forma alotrópica⁵ do carbono), hoje os modernos reatores usam a água pesada⁶ para alenteceer estes nêutrons. (SERWAY, 1992, p.226) e (TIPLER, 1995, p.359-360).

Observe na figura 4.5 um esquema de funcionamento de uma usina termonuclear. No núcleo do reator acontece o processo de fissão através de reações em cadeia. O calor gerado aquece a água do circuito primário, que é mantida em alta pressão, evitando, assim que esta água entre em ebulição. Esta água do circuito primário funciona como elemento moderador no reator. O calor é transferido do circuito primário para a água do circuito secundário. O vapor formado no circuito secundário é submetido a altas pressões para acionar as turbinas que estão acopladas aos geradores que farão a transformação da energia cinética em energia elétrica. Após passar pelas turbinas este vapor é condensado para novamente retornar ao circuito secundário. Note que não há contato da água nos circuitos, a fim de que, a água do circuito secundário não fique contaminada com a radiação gerada no circuito primário. Este tipo de reator é conhecido como PWR. Há outros tipos, o BWR, o CANDU, o HTGR, o LMFBR e o do tipo RBMK. (PERUZZO, 2012, p.147-153).

⁵ Alótropos são diferentes modificações estruturais de um elemento.

⁶ Na água pesada os dois átomos de hidrogênio, que possui somente um próton no núcleo, são substituídos por dois átomos de deutério, que diferente do hidrogênio possui no núcleo um próton e um nêutron, sendo assim, um elemento mais pesado.

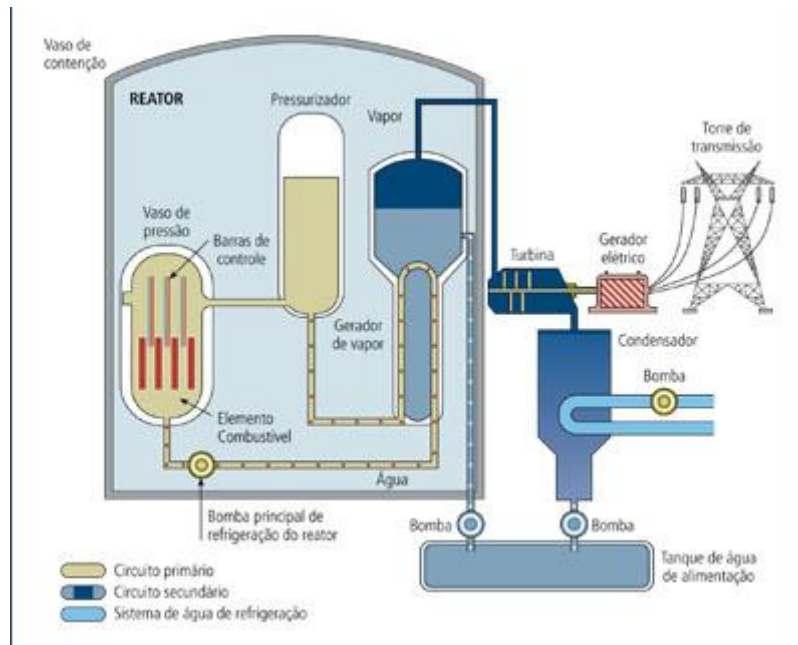


Figura 4.5 – Esquema de funcionamento de uma Usina Termonuclear.

Extraído de <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/outras_fontes/10_2.htm>

Nos exemplos apresentados analisamos a fissão do urânio-235. Evidentemente existem outros elementos fissuráveis. Ainda no lançamento das bombas atômicas que inauguraram a Era Atômica, a lançada sobre a cidade de Hiroshima teve como combustível o urânio, já a lançada sobre Nagasaki era de plutônio.

3.2 FUSÃO NUCLEAR:

Diferente da Fissão, na qual tínhamos um núcleo “pesado” sendo dividido, na Fusão temos núcleos “leves” que se fundem.

Na natureza, o processo de Fusão Nuclear acontece no interior das estrelas. Quanto mais massiva a estrela, mais complexo é o fenômeno da Fusão, gerando elementos mais pesados. Há estrelas que fundem o Hélio produzindo Carbono, Oxigênio e Neônio. Estrelas mais massiva produzem elementos ainda mais pesados, nesta sequência até a produção do Ferro. Para a formação de elementos mais pesados, somente através de explosões de supernovas. No interior do nosso Sol acontece o processo de Fusão, sem o

qual não haveria vida na Terra, onde ocorre a transformação do Hidrogênio em Hélio. Esta transformação não é direta, o processo envolve, basicamente, cinco etapas. Na figura 4.6 vemos uma representação desta sequência.

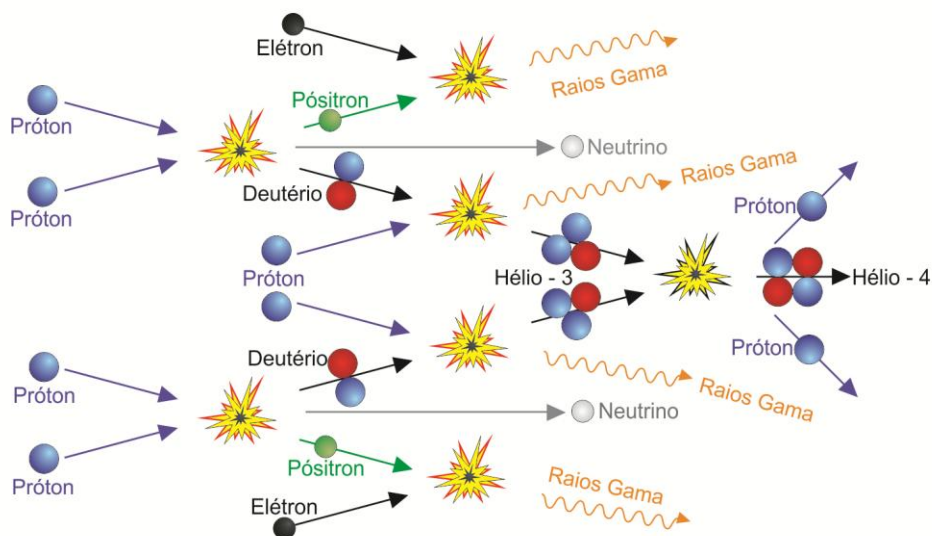
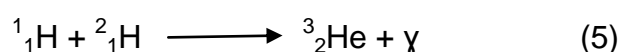
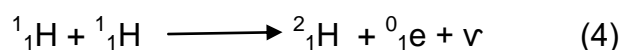


Figura 4.6 – Esquema representativo das etapas do processo de Fusão Termo-Nuclear.

Fonte: Fusão termo-nuclear, extraído de <<http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node10.htm>>, acesso em 30/08/2015

A equação correspondente a esta sequência é:



(SERWAY, 1992, p.229)

Através da figura 4.6, que é bastante esclarecedora, vemos que, dois prótons, (núcleo do átomo de Hidrogênio, ${}^1_1\text{H}$) se fundem e desta fusão resulta um pósitron⁷ (${}^0_1\text{e}$) e um deutério (${}^2_1\text{H}$). Há também, neste processo, a emissão de neutrino⁸ (ν). Após esta primeira fusão o deutério resultante se funde com outro próton produzindo, nesta segunda fusão, o Hélio-3 (${}^3_2\text{He}$). Há também a

⁷ O pósitron é a antipartícula do elétron, ou seja, possui as mesmas características do elétron, mas sua carga, ao contrário do elétron é positiva.

⁸ Neutrinos são partículas subatômicas neutras, isto é, sem carga elétrica.

emissão de radiação gama γ^9 . E finalmente o Hélio-3 se funde a outro Hélio-3, resultante de outro processo que ocorreu paralelamente a este, e formam o núcleo do Hélio (${}^4_2\text{He}$), liberando, ainda dois prótons. Essa reação é chamada de ciclo pp (próton-próton) que é responsável por 85% da energia produzida pelo Sol. Este processo de fusão termonuclear acontece em função de valores de temperatura e pressão extremas, da ordem de quinze milhões de graus Celsius (15.000.000 °C) e trezentos e quarenta milhões de atmosferas (340.000.000 atm) (PIETROCOLA, 2010, p.423). Neste processo o núcleo do átomo de Hélio possui uma massa menor do que a massa dos quatro prótons que iniciaram o processo, caracterizando assim, que houve transformação de matéria em energia, confirmando, mais uma vez, a equação de Einstein.

$$E = m.c^2$$

A diferença de massa entre o início e o término deste processo de fusão termonuclear é de 0,0277 u.m.a.¹⁰.

Em kg, unidade do Sistema Internacional de Unidades (SI), temos:

$$m = 4,5982 \times 10^{-29} \text{ kg}$$

Aplicando este valor na equação de Einstein onde c é a velocidade da luz no vácuo, que equivale a 3×10^8 m/s, calculamos a energia gerada em cada fusão, que é:

$$E = 4,14 \times 10^{-12} \text{ Joules}^{11} \text{ (J)}$$

É um valor pequeno, mas se pensarmos que este fenômeno ocorre milhares de vezes por segundo o resultado final é muito significativo. Medidas realizadas mostram que a Terra recebe 1367,5 W / m²; com uma variação de 0,3% durante o ciclo solar de 11 anos. Em termos de comparação, é a quantidade de energia equivalente a queima de duzentos quintilhões (2×10^{20} ou 200.000.000.000.000.000.000) de galões de gasolina por minuto, ou ainda, 10 milhões de vezes a produção anual de petróleo da Terra no início dos anos 2000 (OLIVEIRA FILHO, 2004, p.127).

⁹ Radiação gama são emissões de fótons extremamente energéticos, da ordem de 1 MeV a 1 GeV.

¹⁰ u.m.a. significa unidade de massa atômica e equivale a $1,6 \times 10^{-27}$ kg.

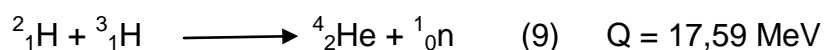
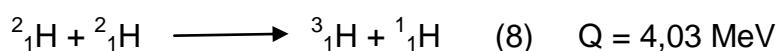
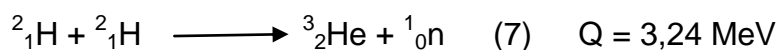
¹¹ Joule, cujo símbolo é J, representa a unidade de energia do Sistema Internacional de Unidades

Outro fato que vale uma observação é que os raios gama, emitidos nas fusões descritas anteriormente, sofrem, no interior do Sol, uma quantidade tão grande de colisões que gasta, em média, cem mil (100.000) anos para atingir a superfície. Podendo levar até um milhão (1.000.000) de anos para realizar uma trajetória que se fosse uma linha reta levaria em torno de dois (2) segundos, conforme ensina o professor Alex filipenko. (DISCOVERY, 2014)

Como vimos acima, as quantidades de energia geradas nos processos de fusão são imensamente grandes, e isto tem incentivado os cientistas a descobrirem métodos e processos de controlar este fenômeno. Além das quantidades imensas de energia os subprodutos da fusão, ao contrario da fissão, são inofensivos.

Ao longo de décadas os cientistas têm desenvolvido reatores de fusão, na tentativa de se obter energia através deste processo.

Como as reações de fusão que acontecem no interior do Sol, na interação próton-próton acontecem em função da existência de valores de temperatura e pressão imensamente grandes. Impossíveis, no momento, de serem obtidas em laboratório o que se tem procurado realizar são reações de fusão por outros caminhos. No presente momento, os elementos que parecem ser mais possível de se obter mais sucesso são o deutério (${}^2_1\text{H}$) e o trítio (${}^3_1\text{H}$), que são isótopos do hidrogênio. Estas reações são:



(SERWAY, 1992, p.229)

Os valores de Q representam a energia liberada em cada uma das reações.

O deutério é relativamente fácil de ser extraído a baixo custo. Como é uma partícula extraída da água é abundante. Com aproximadamente quatro (4) litros de água é possível extrair 0,12 g de deutério. Quanto ao trítio, é um

material radioativo, de meia vida 12,3 anos ($T_{1/2} = 12,3$ anos) e também deve ser produzido artificialmente. (SERWAY, 1992. p.229).

A grande dificuldade de se obter êxito ao se realizar, em laboratório, o fenômeno da fusão é se conseguir vencer a repulsão coulombiana existente entre os prótons posicionados no núcleo dos átomos. O gráfico da figura 4.7 mostra a relação entre a energia existente entre dois dêuterons¹², ($U(r)$) e a distância entre eles (r). R , que é da ordem de um Fermi¹³ (1 fm), é a distância limite de ação entre as forças coulombianas e a força nuclear forte. Para os valores de $r > R$, prevalece a repulsão coulombiana. Para $r < R$, prevalece a força nuclear forte. Logo, para que ocorra a fusão é necessário que se imprima, aos dois núcleos, uma energia cinética o suficiente para vencer a força de repulsão entre eles. Ocorre que, para se atingir este nível de energia cinética é necessário que as temperaturas atinjam valores de ordem de cem milhões de graus Celsius (100.000.000 °C), maiores do que as temperaturas estimadas no núcleo do Sol (SERWAY, 1992, p.229).

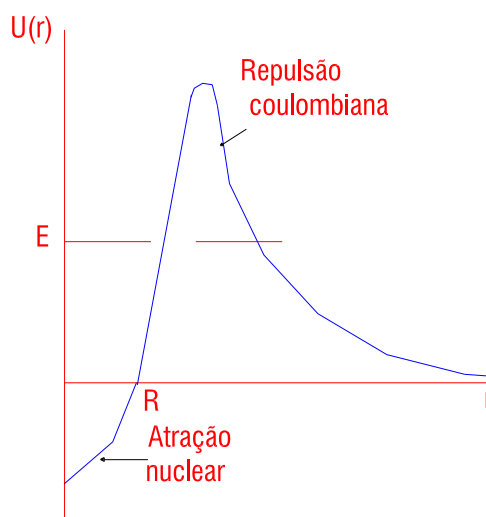


Figura 4.7 – Gráfico Distância x Energia entre os dêuterons.

Adaptado de: SERWAY, Raymond A.. Física 4 para cientistas e engenheiros com Física Moderna. Tradução de Horácio Macedo. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1992. p.229.

¹² Dêuteron é o núcleo do deutério.

¹³ Femtômetro ou Fermi é uma unidade de comprimento usada na Física Nuclear $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.

Apesar dos esforços de se desenvolver um Reator de Fusão Nuclear, através de pesquisas com reatores de fusão a laser e reatores de fusão por eletroímãs. Pois sabemos que quando esta tecnologia for dominada será uma gigantesca conquista na geração de energia, pois através da fusão nuclear teremos energia limpa e ilimitada. Infelizmente à humanidade, até o presente momento, não conseguiu produzir, de forma economicamente viável, a fusão nuclear, para fins de geração de energia. O que se produziu até agora é a bomba de nêutrons, que usa a bomba atômica como gatilho para produzir temperaturas o suficiente para provocar a fusão dos materiais combustíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BODANIS, David. $E = mc^2$: uma biografia da equação mais famosa do mundo e o que ela significa. Tradução Vera de Paula Assis. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001. 327p.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. Física 4. Tradução Alexandre Carlos Tort [et. all]. 4ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996. 338p.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica 4. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 1998. 437p.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza. SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Astronomia e Astrofísica. 2 ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física. 2004. 557p.

PERUZZO, Jucimar. Física e Energia Nuclear. 1 ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física. 2012. 376p.

PIETROLOCA, Maurício P. Pinto de Oliveira, [et al.]. Física em contextos: pessoal, social e histórico: energia, calor, imagem e som. V2. 1.ed. São Paulo: FTD. 2010. 623p.

SASSERON, Lúcia Helena. CARVALHO, Anna Maria Pessoa de Carvalho. "Alfabetização Científica: Uma Revisão Bibliográfica" Investigação em Ensino de Ciências, v.16 (1), pp. 59-77, 2011.

STRATHERN, Paul. Oppenheimer e a Bomba Atômica em 90 minutos. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998. 93 p.

SERWAY, Raymond A.. Física 4 para cientistas e engenheiros com Física Moderna. Tradução de Horácio Macedo. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1992. 287p.

RAMOS, Suami João Martins. Alfabetização Científica no Ensino de Fissão e Fusão Nuclear para o Ensino Médio. Dissertação de Mestrado apresentada ao Polo do Sul Fluminense (UFF/PUVR/ICEx) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), Volta Redonda, 2015.

TIPLER, Paul A. Física para cientistas e engenheiros vol. 4 Ótica e Física Moderna. Tradução Horácio Macedo. 3ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1995. 449p.

ENDEREÇOS ELETRÔNICOS UTILIZADOS NA APLICAÇÃO DESTE PRODUTO.

BBC. SCIENCE CHANNEL CO-PRODUCTION. Einstein e sua equação de vida e morte. Disponível em: <http://www.dailymotion.com/video/xshkn6_einstein-equacao-da-vida-e-morte_tech>. Acesso em: 28 mar. 2015.

BBC. SCIENCE CHANNEL CO-PRODUCTION. Oppenheimer e a bomba atômica. 2002. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=dZG-ULyCWEU>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

PHET, Extraído de: <https://phet.colorado.edu/pt_BR>. Acesso em 14/01/2015

YOUTUBE. Disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=F1u3YFNe5ls>>. Acesso em 15 set. 2015.