

SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA RADIOATIVIDADE NO NÍVEL MÉDIO

Silvia Oliveira Resquetti e Polonia Altoé Fusinato

Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, Centro de Ciências Exatas,
Universidade Estadual de Maringá, Brasil.
E-mails: ¹sresquetti@yahoo.com.br, ²altoepoly@gmail.com.

1. APRESENTAÇÃO: AOS PROFESSORES DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

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

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

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

Justificativa

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

Objetivos gerais

Constituem-se como objetivos gerais:

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

Público-alvo:

Alunos do 3º ano do Ensino Médio.

Metodologia

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

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

Papel do professor

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

Avaliação

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

1.1. Esquema de organização da sequência didática

As atividades da sequência didática estão organizadas da seguinte forma:

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

Atividade 05	Apresentação de pesquisas realizadas pelas equipes de alunos sobre: • Bombas atômicas. • Acidentes nucleares e radioativos.	2
Atividade 06	• Retorno ao problema social original: consequências do acidente radioativo de Fukushima e as perspectivas do uso da energia nuclear para a geração de eletricidade.	1

Quadro 1: Esquema de organização das atividades da sequência didática.

1.2. Encaminhamentos das atividades

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

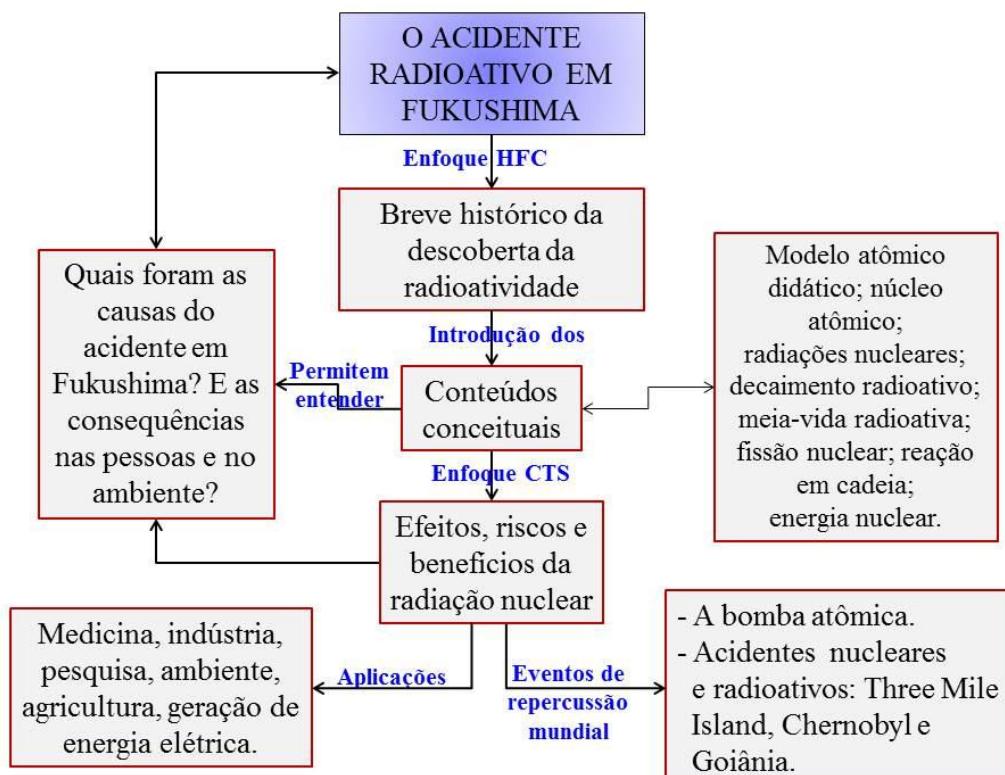


Figura 1: Encaminhamentos das atividades da sequência didática.

2. ATIVIDADE 1

INTRODUÇÃO DO PROBLEMA SOCIAL: O ACIDENTE RADIOATIVO DE FUKUSHIMA

Papel do professor

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

O que se espera

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

Material didático-pedagógico e estratégias

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

ENCAMINHAMENTO DA ATIVIDADE 1

TEXTO: O ACIDENTE RADIOATIVO DE FUKUSHIMA

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

No dia 11 de março de 2011, ocorreu, no Japão, às 14h46min do horário local, um evento cisne negro. Um **terremoto** de magnitude 8,9 pontos na escala Richter¹, seguido de eventos não previstos, causou o pior acidente com uma usina nuclear depois de Chernobyl, em 1986. O epicentro foi a 24,4 quilômetros abaixo do solo do Oceano Pacífico, a 130 quilômetros da costa leste japonesa e a 370 quilômetros da capital, Tóquio. Foi o maior terremoto já registrado no país e o sétimo maior do mundo.

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

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

¹ A escala Richter é uma escala logarítmica de base 10, que mede a magnitude sísmica de terremotos. Inicia no grau zero e não existe limite máximo (teoricamente), embora não haja registros de terremotos acima de 10 graus. Um terremoto com magnitude 6 na escala Richter, por exemplo, é 10 vezes mais intenso do que um de grau 5. A escala foi criada em 1935 pelos sismólogos Charles Francis Richter e Beno Gutenberg, ambos do Instituto de Tecnologia da Califórnia, EUA.

Entenda o terremoto no Japão



Figura 2: Mapa indicando o ponto onde ocorreu o epicentro do terremoto na costa leste do Japão, em 11/03/2011. Fonte: http://4.bp.blogspot.com/-IXX8fCOUkmw/TfNSh1aZFeI/AAAAAAAACdo/PZBALVchU_M/s1600/japaov31.jpg

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

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

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

Áreas afetadas pelo terremoto e tsunami no Japão



Figura 3: Mapa ilustrando o epicentro do terremoto e a localização do complexo nuclear de Fukushima Daiichi.
Fonte:
<http://s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2>



Figura 4: Vista aérea da usina nuclear de Fukushima I e do quebra-mar, antes de 11/03/2011.
Fonte: http://4.bp.blogspot.com/-FSPIczz-egQ/TXvLyvgTeI/AAAAAAAAnY/wHLg8YPS_I/s1600/r

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



Figura 5: Momento em que as ondas do tsunami ultrapassaram a barragem de contenção e inundaram a central nuclear de Fukushima Daiichi.

Fonte: http://4.bp.blogspot.com/-zIHiwKqk_oc/Tde1mGBA6RI/AAAAAAAAGg/Qeqgil7SSXk/s640/fukushima_0519_01.jpg.

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

Assim que ocorreu o intenso sismo, “apagões” em vários lugares do país interromperam o fornecimento normal de **energia elétrica**. Embora os reatores tenham-se desligado automaticamente durante o tremor, o sistema de refrigeração deveria continuar funcionando por meio de geradores de emergência, mas não foi o que aconteceu na estação de Daiichi. A inundação danificou os geradores a diesel e interrompeu o sistema automático de refrigeração. O reator nº 1 foi o primeiro a apresentar aquecimento em níveis perigosos; por esta razão, os técnicos japoneses procuraram ligar os geradores-reserva para reativar o resfriamento, mas a tentativa não foi bem sucedida.

Mesmo quando desligado, um reator continua se superaquecendo² e, por isso, deve ser resfriado para não derreter. O derretimento de um reator é o pior acidente que pode acontecer em uma usina nuclear, uma vez que a explosão lança na atmosfera grandes quantidades de

² Uma vez iniciada a reação de fissão nuclear do combustível radioativo, não é possível extinguí-la instantaneamente, uma vez que a taxa de desintegração diminui gradativamente.

materiais radioativos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente. Foi o que aconteceu, por exemplo, em Chernobyl, na Ucrânia.

Para minimizar o problema na central de Fukushima I, os técnicos abriram as válvulas do reator nº 1 para liberar o **vapor radioativo** acumulado e diminuir a pressão interna. No dia seguinte ao terremoto, houve a **explosão** no edifício que abrigava o reator: o equipamento não foi danificado, porém, quatro trabalhadores ficaram feridos (ACRO, 2011).



Figura 6: Edifício do reator nº 1 após a explosão ocorrida no dia 12/03/2011.
Fonte: <http://s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2011/03/13/1.jpg>.

- Apresentar **VÍDEO 3**: “*Entenda o problema nos reatores de Fukushima*” – YouTube.
Duração: 01min12s.
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=ZUYqGLUIxSY>.

No dia 14 de março, ocorreu a explosão no edifício do reator nº 3. Onze trabalhadores ficaram feridos, sendo que três deles foram rejeitados pelos hospitais da região por medo de contaminação, embora eles não estivessem fortemente contaminados. As barras de combustível do reator, com 4 metros de altura, ficaram expostas (descobertas) a uma altura de 2,95 metros, aumentando o **risco de explosão e vazamento de radiação**. No dia 15, aconteceu uma nova explosão, desta vez no prédio do reator nº 2, o que levou o gerente a evacuar 650 trabalhadores da usina de Daiichi, permanecendo apenas 50 funcionários no local (ACRO, 2011).

Nos dias que se seguiram, engenheiros, técnicos e militares japoneses conseguiram evitar, heroicamente, um acidente pior, bombeando água do mar para refrigerar os reatores. A operação foi muito trabalhosa e de alto risco. Caminhões de bombeiros e até helicópteros do

exército foram usados na operação, expondo todos os envolvidos à **contaminação pelos vapores radioativos** expelidos das instalações danificadas. A água misturada com boro foi injetada, aos poucos, nos reatores para controlar a temperatura e, com esse procedimento, os japoneses conseguiram evitar o derretimento das barras de combustível nuclear e a explosão dos reatores. Contudo, os vapores radioativos, que foram liberados na atmosfera para diminuir a pressão dos reatores, contaminaram a região no entorno do complexo nuclear de Fukushima, afetando o meio ambiente, os trabalhadores e as pessoas que ali viviam. Os níveis de radiação flutuaram drasticamente durante a crise, porém, a extensão dos danos causados à saúde das pessoas e ao meio ambiente ainda está sendo estudada.

- Apresentar **VÍDEO 4** – “*Terremoto no Japão: cresce a preocupação com as usinas nucleares*” - YouTube. Entrevista com o físico nuclear Luis Pinguelli Rosa, da UFRJ.
Duração: 04min13s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=e93Ke5ktbHU>.

- Apresentar **VÍDEO 5** – “*Japão: consequências da radiação*” – YouTube.
Entrevista com o físico nuclear José Goldemberg. Duração: 03min05s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=z9p5oVuFwu0>.

Para refletir e discutir

- 1) De acordo com as imagens e vídeos apresentados, quais foram as causas do acidente radioativo em Fukushima?
- 2) Você sabe identificar qual é a peça-chave de uma usina nuclear, para que serve e que combustível é utilizado para o seu funcionamento?
- 3) O que aconteceu aos reatores nºs 1, 2 e 3, culminando no vazamento de radiação nuclear na atmosfera? Houve explosão nuclear? Comente a esse respeito.
- 4) A radiação nuclear é nociva ao meio ambiente e ao ser humano? O que você sabe a esse respeito?
- 5) Você sabe dizer por que um reator nuclear, mesmo desligado, continua se superaquecendo?
- 6) O vídeo 4 mostra uma entrevista com o físico nuclear Luis Pinguelli Rosa, da UFRJ, e o vídeo 5 apresenta uma entrevista com o físico nuclear José

Goldemberg. Os cientistas mencionam formas de radioatividade liberadas pelos reatores na atmosfera, em virtude do acidente. Que formas de radiação são essas?

- 7) De acordo com os físicos nucleares entrevistados, o que a radiação nuclear pode causar ao ser humano? E no ambiente, quais são as consequências da contaminação radioativa mencionadas pelos cientistas?
- 8) Pinguelli Rosa fala de fissão nuclear, produtos de fissão e desintegração radioativa. Você sabe explicar esses conceitos físicos?
- 9) O físico Pinguelli Rosa menciona os acidentes de Chernobyl e Goiânia. Você já ouviu falar desses acidentes? Comente o que você sabe a esse respeito.
- 10) E o que você sabe sobre as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki, no Japão, no final da Segunda Guerra Mundial? Comente sobre isso.
- 11) De acordo com Goldemberg, após o acidente de Fukushima, o mundo verá com outros olhos a utilização da energia nuclear. Você concorda com Goldemberg? Podemos afirmar que as usinas nucleares são 100% seguras? O que você pensa a esse respeito?

Para pesquisar em grupo

Propomos algumas pesquisas para serem desenvolvidas em equipes, com o intuito de preparar o aluno para o exercício da cidadania. Sugerimos ao professor organizar os grupos logo ao final da atividade 1, orientar sobre as fontes de pesquisa, formas de apresentação dos trabalhos e tempo máximo para cada equipe. A ideia é proporcionar aos alunos conhecimentos básicos para as discussões durante as apresentações das atividades 4 e 5.

Os temas que recomendamos são os seguintes:

- Funcionamento básico de um reator e de uma usina nuclear.
- Rejeitos radioativos e a sua destinação.
- Aplicações da energia nuclear na medicina.
- Aplicações da energia nuclear na indústria.
- Aplicações da energia nuclear na agricultura.
- Datação por carbono-14.

- O Projeto Manhattan. Pesquisar sobre o Projeto e o contexto social e político que levou o governo dos Estados Unidos da América a fabricar e lançar as bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki.
- As Bombas Atômicas de Hiroshima e Nagasaki. Investigar sobre as consequências imediatas provocadas pelas bombas atômicas e os efeitos biológicos da radiação produzidos na população das cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki.
- O acidente nuclear de Chernobyl, Ucrânia (1986).
- O acidente radioativo de Goiânia, Brasil (1987).
- O acidente nuclear de Three Mile Island, EUA (1979).

Sugestões de vídeos complementares para o desenvolvimento da atividade:

DAY when tsunami struck - Japan 2011. YouTube. 19min58s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=eeLlySDmjuw>. Acesso em: 27 nov. 2012.

MAPA de visualizacion de todos los terremotos de 2011 em Japón. YouTube. 09min57s: color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=aeCb8QVHL4o>. Acesso em: 29 nov. 2012.

3. ATIVIDADE 2

RADIOATIVIDADE: UM BREVE HISTÓRICO

Papel do professor

O papel do professor é envolver os estudantes nas discussões a respeito dos eventos que culminaram na descoberta da radiação nuclear e das contribuições dos cientistas que levaram à compreensão das propriedades físicas do fenômeno. É fundamental destacar que a descoberta da radioatividade não foi devida ao acaso por Becquerel, mas, sim, fruto do trabalho coletivo de vários cientistas ao longo de anos. É importante também discutir sobre os efeitos danosos percebidos nas pessoas que tiveram os primeiros contatos com a radiação nuclear.

O que se espera

Ao discutir o contexto sócio-histórico-cultural em que ocorreu a compreensão do fenômeno da radioatividade, espera-se que o aluno perceba o aspecto não linear da Ciência, contrapondo a ideia de Ciência pronta, imutável e acabada. Espera-se que o estudante entenda que a Ciência é uma construção humana, caracterizada por leis, teorias e princípios elaborados pelo homem ao interpretar os fenômenos naturais. Espera-se, ainda, que o aluno reconheça o caráter do trabalho coletivo de cientistas, do intercâmbio e do debate crítico de ideias.

Material didático-pedagógico e estratégias

- Texto para discussão em grupo
- Imagens e vídeos
- Projetor multimídia

ENCAMINHAMENTO DA ATIVIDADE 2

TEXTO – RADIOATIVIDADE: UM BREVE HISTÓRICO

Do tubo de Crookes aos raios X

No final do século XIX, cientistas pesquisavam a condução de eletricidade em gases e, para isso, utilizavam uma ampola de vidro contendo um gás, com eletrodos nas duas extremidades. A corrente elétrica era detectada quando uma diferença de potencial era aplicada entre os eletrodos metálicos, porém, os cientistas observaram que mesmo com um gás rarefeito no interior da ampola, o amperímetro indicava a passagem de corrente elétrica e isso despertou o interesse do químico e físico inglês William **Crookes** (1832-1919).

Crookes construiu uma ampola fazendo vácuo em seu interior, que ficou conhecida por “ampola de Crookes”. O tubo era constituído por dois eletrodos metálicos dispostos em suas extremidades, aos quais se aplicava uma diferença de potencial (ddp). O cientista inglês

percebeu que a parede de vidro, onde os raios incidiam, tornava-se luminescente, com um brilho amarelo-esverdeado, todavia, não conseguiu explicar tal luminescência.



Figura 7: Tubo de Crookes.

Fonte: http://www.cerebromente.org.br/n20/history/neuroimage2_p.htm.

- Apresentar VÍDEO 6: “*Crookes Maltese Cross tube*” – YouTube.
Duração: 00min41s.

Fonte: http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI.

Em 1897, o físico inglês Joseph John **Thomson**, ao realizar novos experimentos, mostrou que, de fato, os raios catódicos são partículas com carga negativa, as quais foram chamadas de **elétrons**³. Thomson estabeleceu que os elétrons têm massas muito menores que as do átomo, então, essas partículas são subatômicas. A partir de medições cuidadosas feitas com o tubo de descarga, o físico conseguiu determinar que todos os elétrons são iguais e supôs que possuem massa bem definida muito menor que a do átomo (HEWITT, 2011).

- Apresentar VÍDEO 7: “*Descoberta do elétron*” – YouTube.
Duração: 04min20s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen>.

- Apresentar VÍDEO 8: “*Rayos catódicos*” – YouTube. Duração: 02 min.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen&NR=1>.

³ O elétron, a primeira partícula subatômica detectada, já havia sido prevista teoricamente, em 1874. Em 1891, George Johnstone Stoney batizou-a de elétron (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

A detecção do elétron foi o primeiro indício de que **o átomo não é indivisível**. Ora, se havia uma partícula subatômica com carga negativa, então seria necessário que existisse outro tipo de partícula que fosse positiva para manter a neutralidade da matéria. As conclusões que resultaram a partir da detecção do elétron levaram à elaboração dos **modelos atômicos** de Nagaoka em 1903, de Thomson em 1904, de Rutherford em 1911 e de Bohr em 1913.

Entre os vários cientistas que se dedicavam às pesquisas com os raios catódicos, estava Philipp Lenard. Lenard modificou o tubo de Crookes colocando uma janela de alumínio por onde os raios catódicos podiam escapar para o exterior. Defronte à janela, posicionou um anteparo fluorescente e verificou que até uma distância de 8 centímetros, ele detectava luminescência devida aos raios catódicos (OKUNO; YOSHIMURA, 2010).

Em 1895, Wilhelm Conrad **Röntgen** (1845-1923), físico alemão experimental, dedicava-se aos estudos com tubos de descarga (ampola de Crookes). Röntgen repetiu o experimento de Lenard, embrulhando o tubo com papel preto para que a luminescência no vidro não atrapalhasse a visão no anteparo fluorescente. Apagou a luz do laboratório e foi afastando o anteparo fluorescente até 2 metros de distância do tubo, observando que a luminescência persistia. Ligou e desligou o tubo várias vezes, e toda vez que desligava, a luminescência desaparecia. Suas observações levaram-no a concluir que os raios que emanavam do tubo não eram os raios catódicos, mas um tipo diferente de radiação. Esses novos raios eram mais penetrantes e não sofriam desvios na presença de campos elétricos ou magnéticos.



Figura 8: Wilhelm Conrad Röntgen.

Fonte:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/Wilhelm_Conrad_R%C3%B6ntgen_%281845--1923%29.jpg.

Segundo Okuno e Yoshimura (2010), Röntgen realizou experimentos colocando diversos materiais entre o tubo e o anteparo. Observou que os raios emitidos tinham grande capacidade de atravessar desde livros, madeiras, placas metálicas com diferentes espessuras e até certos líquidos. Ao colocar um material diante do tubo, percebeu, atônito, o contorno dos ossos de seus dedos na tela fluorescente.



Figura 9: Ilustração representando as observações de Röntgen ao colocar a mão entre o tubo de Crookes e o anteparo.

Fonte: <http://www.lookandlearn.com/blog/1560/roentgen-discovers-x-rays/>.

No dia 22 de dezembro de 1895, Röntgen radiografou a mão esquerda de sua esposa, Anna Bertha, que permaneceu estática durante 15 minutos de exposição. Foi a **primeira radiografia** de um membro do corpo humano em vida, inclusive, mostrando claramente a aliança que usava em sua mão. A famosa radiografia (raio X) encontra-se exposta no Deutsches Museum (Alemanha).



Figura 10: Raio X da mão da Sr^a. Anna Bertha Ludwig, esposa de Röntgen.

Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e3/First_medical_X-ray_by_Wilhelm_R%C3%BCntgen_of_his_wife_Anna_Bertha_Ludwig's_hand - 18951222.gif.

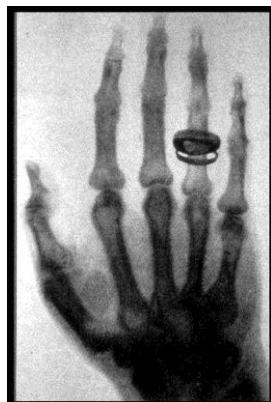


Figura 11: Ilustração dos raios X da mão direita de Albert von Kölliker, presidente honorário da Associação de Física e Medicina de Würzburg. A imagem foi feita por Röntgen e apresentada à Associação durante a exposição do relatório sobre a descoberta dos raios X, em 23 de janeiro de 1896.

Fonte: <http://images.encydia.com/thumb/e/e4/Roentgen-x-ray-von-kollikers-hand.jpg/250px-Roentgen-x-ray-von-kollikers-hand.jpg>.

Röntgen batizou o novo fenômeno de **raio X**, por questão de brevidade e por não saber o que era. A notícia da detecção do fantástico fenômeno foi publicada na primeira página de um jornal de Viena, em 5 de janeiro de 1896, e correu rapidamente o mundo.

A radiação natural de elementos químicos

A detecção da radioatividade é atribuída a Antoine Henri **Becquerel** (1852-1908), físico francês descendente de uma ilustre família de cientistas; todavia, há indícios de que o pesquisador não reconheceu que o efeito que havia observado em seus experimentos tratava-se, na verdade, de um fenômeno ainda desconhecido.



Figura 12: Antoine Henri Becquerel.
Fonte: http://www.websters-dictionary-online.com/images/wiki/wikipedia/commons/thumb/a/a3/Henri_Becquerel.jpg/225px-Henri_Becquerel.jpg.

Na época, sabia-se que existiam semelhanças muito grandes entre os raios X e os raios ultravioletas. Em virtude dessas semelhanças, pensou-se que os raios X poderiam ser um novo tipo de onda eletromagnética de alta frequência (MARTINS, 2012).

Em 1896, após tomar conhecimento da nova radiação observada por Röntgen, Becquerel passou a investigar compostos de urânio que se tornavam fluorescentes após receber luz solar. A hipótese (falsa) de Becquerel era a mesma de seus colegas, ou seja, a de que os compostos de urânio também emitiam raios X, assim que ocasionassem forte fluorescência ao atingirem certas substâncias. Para comprovar sua ideia, Becquerel colocou uma amostra de uma substância luminescente - o sulfato duplo de urânio e potássio - sobre uma placa fotográfica envolta em duas folhas de papel negro muito espesso e a expôs à luz solar no peitoril da janela por várias horas. As primeiras experimentações sugeriam que o material emitia raios X, pois a silhueta da amostra aparecia na placa revelada; contudo, durante um período de tempo nublado, ao guardar uma amostra em uma gaveta sem incidência de luz durante sete dias, observou que a chapa fotográfica também ficara impressionada. Becquerel, porém, não reconheceu nada de novo nessas observações e, assim, continuou a basear suas explicações em fenômenos conhecidos.

- Apresentar **VIDEO 9 : Ponto Ciência – Experimento de Becquerel** – YouTube.

Duração: 06min47s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=Do-p-GdWUc0>.

De acordo com a interpretação de Martins (2012), foi o casal **Marie Curie e Pierre Curie** que deu as principais contribuições ao estudo da radioatividade. Marie Skłodowska Curie (1867-1934), uma estudante de física e química entusiasmada com o fenômeno descoberto por Becquerel, em 1897 resolveu escrever sua tese de doutorado sobre o tema (FUCHS, 1972). Estudou vários minerais e substâncias químicas puras e foi quem usou pela primeira vez o termo **radioatividade**.



Figura 13: Marie Curie.

Fonte: http://reich-chemistry.wikispaces.com/Fall.2008.MM_A.Gels.Forte.Timeline.

Em 1898, Marie Curie e Pierre Curie conseguiram separar finos traços de um elemento 400 vezes mais radioativo do que o urânio, ao qual chamaram de **polônio** em homenagem à Polônia, país natal de Marie Curie. E juntamente com Gustave Bélmont, o casal Curie detectou outro elemento 900 vezes mais ativo do que o urânio, ao qual chamaram de **rádio**, pois parecia ser mais radioativo do que qualquer outro elemento (FUCHS, 1972; MARTINS, 1998).

O fenômeno da radioatividade, entretanto, ainda não estava explicado, já que muitas perguntas continuavam sem respostas: Afinal, as radiações eram iguais aos raios X ou não? De onde vinha a energia desses materiais radioativos? Por que alguns elementos eram radioativos e outros não?

O jovem físico neozelandês Ernest **Rutherford** (1871-1937), da Universidade McGill de Montreal, Canadá, em 1898, também iniciou estudos para entender os *raios de Becquerel*. No início de 1899, ao realizar experimentos com substâncias radioativas, observou que emitiam dois tipos de radiação, identificadas a partir da trajetória de cada uma delas ao passar em um campo magnético. Rutherford classificou-as de acordo com a capacidade de penetrar a matéria: a menos penetrante chamou de **raios alfa (α)** e a mais penetrante de **raios beta (β)** (OKUNO, 2007), pois, a princípio, pensou que essas radiações eram tipos diferentes de raios X. Em 1900, Paul Villard identificou um terceiro tipo de radiação muito mais penetrante, chamada de **raios gama (γ)** que, ao contrário dos raios alfa e beta, não sofria qualquer deflexão em campos magnéticos. Três anos depois, Rutherford observou que a radiação alfa era deflectida elétrica e magneticamente, e concluiu que se tratava de partículas com carga elétrica positiva (MARTINS, 1998).



Figura 14: Ernest Rutherford.

Fonte:

<http://operamundi.uol.com.br/media/images/Ernest%20Rutherford.jpg>.

Posteriormente a esses estudos, a natureza da radioatividade começou a ficar mais clara. As explicações foram surgindo gradualmente ao longo dos primeiros anos do século XX, por meio de contribuições de vários cientistas que estudaram os raios emitidos por núcleos radioativos. Concluiu-se que os raios α são núcleos do átomo do elemento Hélio, composto por dois prótons e dois nêutrons e, logo depois, que os raios β podem ser de dois tipos: elétrons ou pósitrons. Mais tarde, constatou-se que os raios γ são fótons ou ondas eletromagnéticas muito energéticas, de comprimento de onda muito pequeno. Concluiu-se, então, que os *raios de Becquerel* não eram diferentes tipos de raios X, mas sim, **radiações nucleares**, visto que são originadas dentro do núcleo atômico.

Para refletir e discutir

- 1) O que levou William Crookes a construir um tubo de vidro evacuado, conhecido como tubo de Crookes?
- 2) Crookes, ao aplicar uma alta diferença de potencial entre os eletrodos do tubo, observou um fenômeno inesperado na parede de vidro onde os raios incidiam. Que fenômeno Crookes observou? Como o fenômeno ficou conhecido? O cientista conseguiu explicar a natureza do fenômeno?
- 3) Em 1897, o físico inglês J. J. Thomson realizou experimentos com o tubo de Crookes. Seus estudos o levaram a importantes conclusões a respeito dos raios

catódicos. Que conclusões foram estas? Quais foram as contribuições de Thomson para a compreensão da estrutura da matéria? Justifique.

- 4) Em 1895, o físico experimental alemão Wilhelm Röntgen trabalhava com um tubo de Crookes, modificado por Lenard, para estudar os raios catódicos, quando observou a emissão de uma radiação ainda desconhecida. Que fenômeno foi observado por Röntgen? Röntgen conseguiu explicar a origem da nova radiação?
- 5) O casal Marie Curie e Pierre Curie realizou experimentos com vários minerais e substâncias químicas puras. Quais são os dois elementos químicos radioativos detectados pelo casal Curie?
- 6) O jovem físico neozelandês Ernest Rutherford e seus colaboradores realizaram importantes experimentos com materiais radioativos que contribuíram para a compreensão da natureza da radioatividade. O que Rutherford e equipe identificaram nos experimentos?
- 7) A detecção da radioatividade é normalmente atribuída ao físico francês Henri Becquerel. O que você pode argumentar a esse respeito?

4. ATIVIDADE 3

RADIOATIVIDADE: CONTEÚDOS PROPOSTOS PARA O ENSINO MÉDIO

Papel do professor

Nesta etapa, é realizada a transposição didática dos conteúdos científicos para conteúdos escolares. A interação professor-aluno é fundamental, a fim de se construir um ambiente que contribua para um ensino contextualizado e dê sentido ao estudo da radioatividade. Durante o diálogo, o professor tem a possibilidade de identificar as concepções prévias dos estudantes e direcionar o debate entre os grupos. Os aspectos desconhecidos e problemáticos para o aluno devem ser explorados, de modo a situá-lo diante da necessidade de adquirir um conhecimento que ele ainda não possui. Ao mesmo tempo, o professor tem a oportunidade de levar o aluno a vislumbrar a possibilidade de alcançar tal conhecimento. É importante que o educando se sinta à vontade para perguntar, para expor suas hipóteses e ideias, como também para responder aos questionamentos.

As discussões envolvendo os grupos, as generalizações, sínteses e conclusões permitem ao professor introduzir os conceitos, as leis, os modelos e os princípios físicos envolvidos.

Conteúdos propostos

Ao levarmos em consideração o que os professores pensam e vivenciam com relação ao ensino do tema, propomos nesta atividade, os conteúdos básicos para o estudo da *radioatividade* no Ensino Médio que o professor poderá abordar em sala de aula. A obra de Okuno e Yoshimura (2010) nos orientou na escolha. O texto é apresentado de modo resumido, porém, expomos os conteúdos de forma mais detalhada no **Apêndice A**. Os conteúdos conceituais selecionados são os seguintes:

- (i) o modelo atômico didático;
- (ii) o núcleo atômico;
- (iii) isótopos e radioisótopos;
- (iv) radioatividade: emissões alfa, beta e gama;
- (v) decaimento radioativo;
- (vi) meia-vida radioativa;
- (vii) fissão nuclear;
- (viii) reação em cadeia;
- (ix) energia nuclear: o reator de fissão e a bomba atômica.

O que se espera

Espera-se o envolvimento do aluno nas discussões, tal que ele tenha condições de questionar e compreender os conteúdos conceituais envolvidos.

Material didático-pedagógico e estratégias

- Texto para discussão em grupo

- Livro didático adotado pela escola
- Livros paradidáticos
- Mapa conceitual
- Vídeos, imagens, experimentos virtuais
- Projetor multimídia

ENCAMINHAMENTO DA ATIVIDADE 3

Ao levarmos em conta o número reduzido de duas aulas semanais de Física no 3º ano, entendemos que o livro didático pode auxiliar na abordagem dos conteúdos, caso o tema seja contemplado na obra; contudo, recomendamos ao professor fazer uso de outras fontes de pesquisa para preparação e complementação dos conteúdos, conforme indicamos nas referências da sequência didática. É interessante também disponibilizar um texto a cada grupo de alunos, com apresentação dos itens abordados.

Para o encaminhamento da atividade 3, elaboramos um texto-resumo dos conteúdos conceituais de radioatividade, com algumas sugestões de estratégias e recursos audiovisuais. Privilegiamos a abordagem qualitativa dos conteúdos, conforme sinalização dos docentes envolvidos na pesquisa. Todavia, reiteramos que o Apêndice A apresenta o desenvolvimento do tema de forma mais detalhada. O professor pode usar o recurso do projetor multimídia para apresentar trechos do texto, o mapa conceitual, as imagens, vídeos e simulações.

Ao final de cada item apresentamos algumas questões para reflexão, com o intuito de professor e alunos fazerem generalizações e sínteses dos conteúdos conceituais trabalhados. Sugerimos ainda ao professor complementar a atividade com questões e exercícios extraídos de livros didáticos e paradidáticos, porquanto entendemos que a resolução de **questões diversificadas** permite ao educando aplicar os conteúdos conceituais abordados, de forma a contribuir para a construção de sua aprendizagem.

TEXTO: CONTEÚDOS CONCEITUAIS DE RADIOATIVIDADE

(i) O MODELO ATÔMICO DIDÁTICO

O modelo atômico para fins didáticos é bastante simplificado, apresentando apenas a estrutura básica do átomo. Essencialmente, o átomo é neutro, é constituído de um núcleo bastante pequeno com carga elétrica positiva, onde estão concentradas as partículas subatômicas – *prótons* e *nêutrons*. Ao redor do núcleo está a eletrosfera, formada por uma configuração de partículas denominadas *elétrons*, com cargas elétricas negativas.

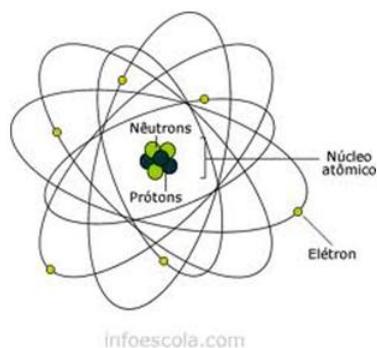


Figura 15: Ilustração do Modelo Atômico Didático.
Fonte: Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.
<http://www.cnen.gov.br/acnen/imagens/atom.png>.

- Apresentar **VÍDEO 10: Vídeo – Experimento de Rutherford** - YouTube.
Duração: 04min08s.
Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=tw1-4TlrcwU>.
(OBS: Sugerimos ao professor comentar os modelos atômicos de Nagaoka, Thomson, Rutherford e Bohr).

O átomo de um elemento químico é caracterizado pelo número de prótons no núcleo, denominado *número atômico Z*; por conseguinte, um elemento químico é definido pelo número de seus prótons. O *número de massa A* é o número de prótons somado ao número de nêutrons no núcleo.

Com o uso do projetor multimídia, sugerimos a apresentação do mapa conceitual, representado a seguir, para a abordagem do modelo atômico bastante simplificado.

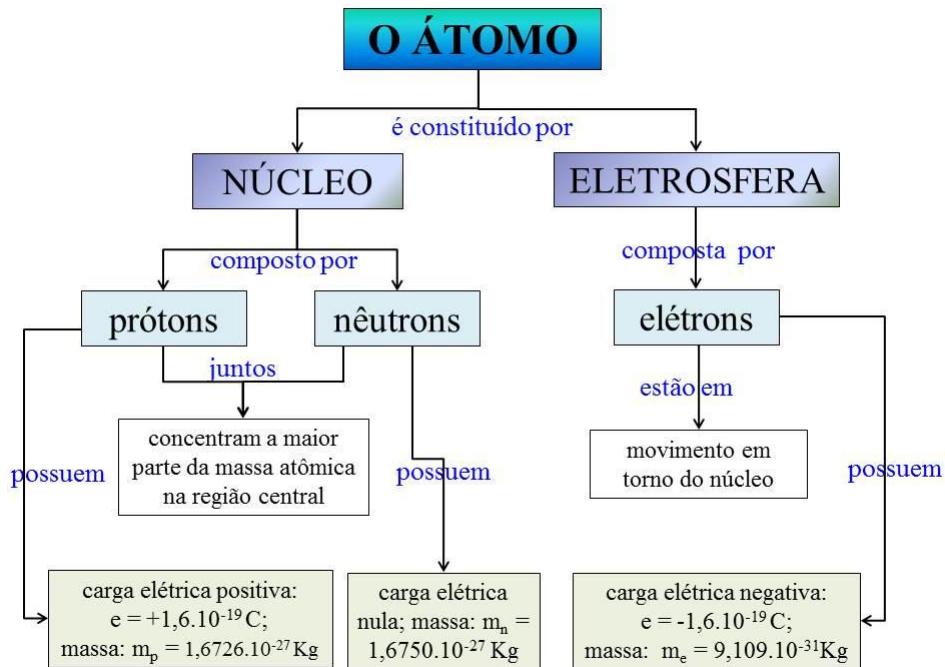


Figura 16: Mapa conceitual para estudo do modelo atômico didático.

- Apresentar **SIMULAÇÃO 1: Monte um Átomo.**

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/build-an-atom.

(OBS: A simulação oferece duas opções muito interessantes: “construir átomo” e “jogo”, para os alunos aprenderem se divertindo. Apresenta ainda recursos que mostram o símbolo do elemento químico, os isótopos, a estabilidade/instabilidade do átomo, a massa atômica e carga elétrica).

ii) O NÚCLEO ATÔMICO

O núcleo atômico é composto por dois tipos de partículas, denominadas *núcleons*: o próton, carregado positivamente, e o nêutron, que não tem carga elétrica.

A maior parte do átomo é espaço vazio. O núcleo é bastante pequeno e concentra a maior parte da massa atômica. Enquanto o diâmetro do átomo é da ordem de 10^{-10} m, o do núcleo tem cerca de 10^{-14} m, isto é, cerca de 10 mil vezes menor do que o átomo.

Sabe-se, contudo, que cargas elétricas sofrem a interação coulombiana, ou seja, cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e cargas elétricas de sinais contrários se atraem. Então, por que o núcleo atômico não se desfaz, logo que os prótons são partículas carregadas com cargas de mesmo sinal e tendem a se afastar uns dos outros pela ação da força de repulsão

elétrica? Essa questão é resolvida por outra força, de ação atrativa, responsável por compensar a força de repulsão coulombiana. A interação forte, ou força nuclear, é que mantém a estabilidade do núcleo. A força nuclear é muito intensa e atrai os *núcleons*, uns em direção aos outros, no interior do núcleo. Como é mais intensa do que a força de repulsão coulombiana, a interação forte mantém os prótons e nêutrons coesos.

Em todos os núcleos encontrados na natureza, as forças nucleares são mais intensas do que as forças coulombianas de repulsão; nos radioisótopos, entretanto, o domínio da força nuclear é tênue. A pequenas distâncias, a força nuclear diminui rapidamente com o aumento da distância entre as partículas nucleares.

Para refletir e discutir

- 1) Recapitulando: Rutherford e colaboradores realizaram importantes experimentos que indicaram o caminho a ser seguido na investigação da estrutura do átomo. O que os pesquisadores concluíram acerca do átomo?
- 2) Quais são os dois diferentes *núcleons* que compõem o núcleo atômico?
- 3) Por que a força elétrica de repulsão entre os prótons de um núcleo atômico não os afasta velozmente uns dos outros? Explique que interação tende a manter juntas as partículas nucleares e que interação tende a afastá-las.

iii) ISÓTOPOS E RADIOISÓTOPOS

Os átomos de um mesmo elemento químico podem ter números diferentes de nêutrons e a consequência imediata é que suas massas são distintas. Assim, os isótopos são os átomos de um mesmo elemento químico que apresentam massas diferentes, em virtude do número diferente de nêutrons. Os isótopos de elementos radioativos são também chamados de radioisótopos.

Para refletir e discutir

- 1) O que os isótopos de um mesmo elemento químico têm em comum? E o que os diferencia?

2) O que são os radioisótopos?

(iv) RADIOATIVIDADE: EMISSÕES ALFA, BETA E GAMA

A **radioatividade** é um processo que tem origem no núcleo atômico e que resulta na emissão espontânea de partículas subatômicas energéticas, constituindo-se assim, numa radiação nuclear. Podemos, então, afirmar que a radioatividade é a transmissão de *radiação nuclear*, ou *emissão de energia nuclear*, ou, ainda, definir a radioatividade como *energia nuclear em trânsito*.

O experimento que mais revela o comportamento da radioatividade é aquele em que a radiação de uma amostra de material radioativo passa por um campo elétrico muito intenso, produzido por duas placas eletricamente carregadas. Observa-se que o feixe inicial é dividido em três radiações distintas. A deflexão em direção à placa carregada positivamente indica que o feixe é composto por partículas de natureza negativa, enquanto que a deflexão na direção da placa negativa indica um feixe composto por partículas positivas. O feixe que segue sua trajetória sem desvio não sofre ação do campo elétrico, logo, não tem carga elétrica. Como ainda não se conhecia a natureza dessas radiações no início do século XX, elas foram denominadas *raios alfa*, *raios beta* e *raios gama*, que constituem as três formas de radiação nuclear.

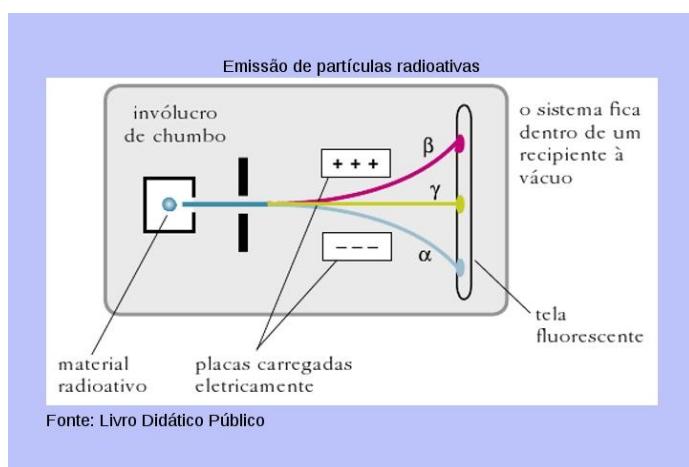


Figura 17: Representação do arranjo experimental para detecção das três radiações nucleares α , β e γ , emitidas por uma amostra de material radioativo. Fonte: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/tvmultimidia/imagens/4quimica/7emissaodepartradio.jpg>.

Após esses estudos, descobriu-se que os raios alfa e beta são partículas providas de carga elétrica e os raios gama são radiações eletromagnéticas (sem carga elétrica). Sabe-se também que essas radiações são ionizantes, uma vez que são capazes de ionizar gases.

Assim, **raio alfa**, ou partícula alfa (α), é um feixe de partículas emitido espontaneamente por núcleos radioativos. É composto por núcleos de hélio, os quais possuem 2 prótons e 2 nêutrons (4_2He). É importante observar que toda vez que um núcleo ejeta uma partícula alfa, o número de massa do núcleo resultante diminui quatro unidades ($A - 4$), enquanto que o número atômico diminui duas unidades ($Z - 2$).

Raio beta, ou partícula beta negativa (β^-), ou simplesmente partícula beta (β), é a emissão espontânea de um elétron de origem nuclear, resultante da conversão de um nêutron em um próton. Embora o número de massa (A) do núcleo resultante não seja alterado pela perda do elétron, o número atômico do núcleo resultante aumenta uma unidade ($Z + 1$). Algumas vezes, o núcleo emite uma partícula beta positiva (β^+) denominada *pósitron*, resultante da conversão de um próton em um nêutron; neste caso, o número atômico do núcleo resultante diminui uma unidade ($Z - 1$). O *pósitron* é a antipartícula do elétron - é idêntico ao elétron, com exceção da carga elétrica que é positiva. Assim, a radiação beta é a emissão espontânea de um elétron negativo de origem nuclear ou de um pósitron (elétron positivo), por um núcleo atômico instável.

Raio gama (γ) é a radiação eletromagnética de alta frequência formada por um feixe de fôtons (sem carga elétrica), emitida por núcleos de elementos radioativos.

Poder de penetração das radiações nucleares

As partículas alfa são as que têm maior massa (2 prótons e 2 nêutrons) e, em virtude de sua grande massa (quando comparada à massa do elétron, que é tomado como referência), o poder de penetração na matéria é pequeno e não conseguem atravessar mais do que alguns centésimos de milímetro na matéria. Uma lâmina de alumínio com 0,66 mm de espessura ou uma folha de papel já é o suficiente para interceptá-las, inclusive a própria pele humana. O alcance é cerca de 7 cm no ar.

A maior parte das partículas beta são elétrons de origem nuclear. Seu poder de penetração é cerca de 50 e 100 vezes maior do que o das partículas alfa, conseguindo penetrar até 16 mm na madeira. No corpo humano, podem penetrar até 2 cm e causar sérios danos. São

barradas por lâminas de alumínio com 1 centímetro de espessura ou por lâminas de chumbo. O alcance é de alguns metros no ar.

Em virtude da natureza ondulatória e ausência de carga elétrica, os raios gama são muito mais penetrantes do que as partículas alfa e beta. São capazes de atravessar dezenas de metros no ar, até 25 cm na madeira e 15 cm no aço. Podem atravessar completamente o corpo humano e causar sérios danos. É possível barrar a radiação gama por meio de placas de chumbo ou por grossas camadas de concreto ou terra. (PIETROCOLA et al., 2010; SAFFIOTI, 1982).

- Apresentar **VIDEO 11 - Tipos de radiação: partícula alfa, beta e radiação gama** – YouTube. Duração: 02min9s. Fonte:
<http://www.youtube.com/watch?v=N1TMhRKiOBk>.

Para refletir e discutir

- 1) Onde se origina a radioatividade?
- 2) Quais são os tipos de radiação emitidos por núcleos de elementos químicos pesados, com número atômico $Z \geq 83$?
- 3) Recapitulando: como era a montagem experimental de Rutherford e equipe, que permitiu detectar as radiações alfa e beta? Os pesquisadores conseguiram detectar a radiação gama?
- 4) Sabe-se que os raios gama são fundamentalmente diferentes dos raios alfa e beta. Qual é a diferença básica entre essas radiações?
- 5) Por que os raios alfa e beta são desviados por campos elétricos e os raios gama não sofrem qualquer desvio?
- 6) Que alteração ocorre no núcleo atômico quando emite uma partícula alfa? E quando emite uma partícula beta? E o que acontece quando um núcleo emite radiação gama?
- 7) Entre as três formas de radiação nuclear, qual delas é a mais penetrante? E a menos penetrante? Ordene em sequência decrescente.

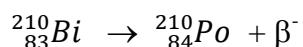
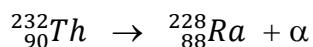
(v) DECAIMENTO RADIOATIVO

A estabilidade nuclear é ditada pelo equilíbrio entre as forças nucleares que agem entre os pares de prótons e nêutrons e a força de repulsão coulombiana entre os prótons; todavia, à medida que o número atômico Z cresce, o número de nêutrons torna-se maior do que o de prótons para manter o núcleo coeso. Isso ocorre porque a força coulombiana de repulsão entre prótons vai aumentando de intensidade, podendo causar o rompimento do núcleo. Desse modo, são necessários mais nêutrons, pois estes experimentam somente a força nuclear atrativa. Como o número atômico Z vai aumentando, o núcleo se torna instável (lembre a simulação “monte um átomo”, em que é possível variar o número atômico).

Os elementos radioativos são aqueles que possuem núcleos instáveis, em virtude do excesso de partículas ou de carga elétrica. Tais núcleos são altamente energéticos e tendem a se estabilizar emitindo espontaneamente partículas e energia. Ao emitirem partículas alfa ou beta, varia o número de prótons no núcleo (diminui ou aumenta), ocorrendo uma alteração do número atômico. Com isso, o elemento químico se transforma, ou se transmuta, e um novo elemento químico é formado. O núcleo original não existe mais. A transformação do núcleo atômico de determinado elemento químico em um núcleo atômico de outro elemento, em virtude da emissão espontânea de partículas nucleares, é conhecida como *decaimento radioativo ou transmutação nuclear*.

Após a emissão das partículas alfa (α) e beta (β), o núcleo resultante que ainda permanece com excesso de energia procura se estabilizar e emite um fóton, ou seja, a radiação gama (γ). Neste caso, o núcleo não sofre transmutação, uma vez que não houve emissão de partículas (CARDOSO et al., 200-).

Apresentamos, como exemplos, a equação de transmutação do tório-232 em rádio-228 ao emitir uma partícula alfa (α) e a do bismuto-210 em polônio-210 ao emitir uma partícula beta negativa (β^-):



- Apresentar **SIMULAÇÃO 2: Decaimento Alfa.**

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay.

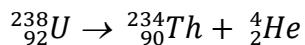
(OBS: Escolher a opção “único átomo”. Relacionar a legenda com o núcleo da simulação, antes e depois da emissão da partícula alfa. Observar o gráfico que relaciona o tempo de decaimento, em milissegundo, com a meia-vida radioativa. Depois, escolher a opção “vários átomos”. OBS: É necessária a instalação do JAVA)

- Apresentar **SIMULAÇÃO 3: Decaimento Beta.**

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/beta-decay.

(OBS: Seguir as orientações apresentadas na simulação 2).

A Teoria das Transformações Radioativas foi apresentada por Ernest Rutherford e Frederic Soddy entre 1902 e 1903. Para entendermos melhor o decaimento radioativo, consideremos o urânio-238, cujo núcleo possui 92 prótons e 146 nêutrons ($^{238}_{92}U$). Quando uma partícula alfa (núcleo do átomo de 4_2He) é emitida, o núcleo de urânio-238 perde dois prótons e dois nêutrons. Como um elemento químico é identificado pelo número de prótons no núcleo (número atômico Z), os 90 prótons e os 144 nêutrons que restaram não constituem mais o urânio-238. Ocorreu, então, a transmutação nuclear e o átomo de urânio-238 não existe mais, surgindo assim, um novo elemento químico, o tório-234 ($^{234}_{90}Th$). Tal decaimento pode ser representado pela seguinte equação:



Costuma-se denominar *núcleo pai* aquele que decai (o urânio-238, por exemplo) e *núcleo filho* o produto do decaimento (o tório-234). Na equação demonstrada, os números de massa dos produtos obtidos (234+4) e os números atômicos (90+2) se equilibram. Durante a transmutação, a energia é liberada de três formas: parcialmente como energia cinética da partícula alfa (4_2He) e como energia cinética do núcleo de tório-234, e parcialmente na forma de radiação gama. O tório obtido desse decaimento também é radioativo e sofre transmutação, produzindo outro elemento químico e liberando energia. (HEWITT, 2011).

Todos os elementos químicos naturais ou artificiais, com número atômico $Z \geq 83$, são radioativos naturalmente e se desintegram sucessivamente passando de um núcleo a outro, até se transformarem em um isótopo estável de chumbo (Pb), com número atômico $Z = 82$, que é o final da radiação natural (Cf. **Anexo A**).

Para refletir e discutir

- 1) Por que um núcleo com número atômico maior é normalmente menos estável do que um núcleo com número atômico menor?

- 2) O que é decaimento radioativo ou transmutação nuclear? É um processo natural?
- 3) Na equação do decaimento do tório-232 (núcleo pai), demonstrada acima, por que o núcleo resultante de rádio-228 (núcleo filho) ficou com número atômico $Z = 88$? E na transmutação do bismuto-210 (núcleo pai), por que o núcleo resultante de polônio-210 (núcleo filho) ficou com número atômico $Z = 84$, maior do que o do núcleo pai?
- 4) O rádio-228 e o polônio-210, produtos resultantes dos decaimentos demonstrados nas equações acima, também sofrem decaimento? Justifique.
- 5) Se o plutônio-239 emitir uma partícula alfa, qual será o número atômico do núcleo resultante?
- 6) O urânio existente em todo o planeta está sofrendo decaimento radioativo a longo prazo. Qual é o destino final de todo urânio?

(vi) MEIA-VIDA RADIOATIVA

Denomina-se *atividade* de uma amostra radioativa o número de decaimentos por unidade de tempo. Assim, a *meia-vida* ($T_{1/2}$) é a medida do tempo necessário para que a atividade de metade dos átomos de uma amostra radioativa sofra decaimento.

O decaimento de uma amostra radioativa ocorre, matematicamente, de forma exponencial, de acordo com a Lei do Decaimento Radioativo, dada pela seguinte equação:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

em que:

N é o número de átomos presentes no instante t ; N_0 é o número de átomos no início da contagem ($t = 0$) da atividade de uma amostra; λ é a constante de decaimento dada por $\lambda = 1/T$, onde T é a meia-vida do elemento radioativo.

O gráfico da figura 18 mostra a curva de um decaimento radioativo. Note que $N_0/2$ corresponde à metade dos átomos de uma amostra após o decaimento radioativo durante o tempo de uma meia-vida T .

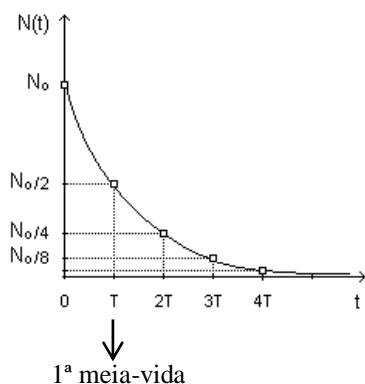


Figura 18: Curva representativa de decaimento radioativo.

Podemos ainda representar o processo de decaimento de uma amostra radioativa por meio da seguinte expressão matemática:

$$M = M_0/2^x$$

em que:

M é a massa final da amostra; M_0 é a massa no início da contagem do tempo ($t = 0$) da atividade da amostra e x é o número de meias-vidas contado em um período especificado.

Por exemplo, se tomarmos 100 gramas de uma amostra radioativa, após um intervalo de tempo de uma meia-vida ($x = 1$) apenas 50 gramas do material continuarão a emitir radiação. Passado um período de duas meias-vidas ($x = 2$), 25 gramas da amostra continuarão a emitir radiação e, assim, sucessivamente, até atingir uma configuração de equilíbrio.

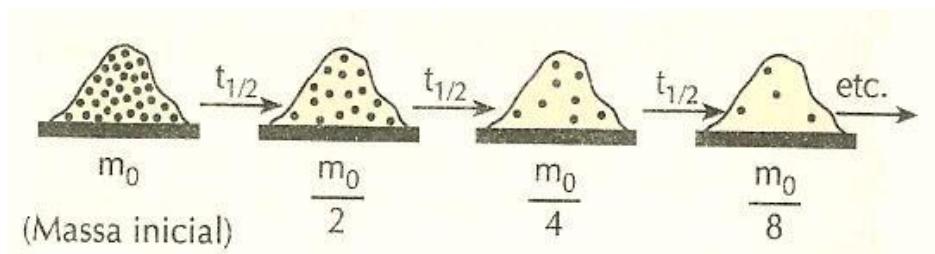


Figura 19: Representação da massa de uma amostra radioativa em função do tempo de meia-vida. Fonte: Química sem Segredos. <http://quimicasemsegredos.com/images/Teoria/radio/radio8.jpg>.

A tabela 1 apresenta a meia-vida de alguns radioisótopos muito usados em medicina:

Tabela 1: Meia-vida de alguns radioisótopos usados em medicina.

Césio-137 (^{137}Cs)	30 anos
Estrôncio-90 (^{90}Sr)	28,2 anos
Cobalto-60 (^{60}Co)	5,26 anos
Irídio-192 (^{192}Ir)	73,8 dias
Iodo-131 (^{131}I)	8 dias
Iodo-123 (^{123}I)	8 dias
Ouro-198 (^{198}Au)	2,7 dias
Tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)	6 horas

Fonte: OKUNO; YOSHIMURA (2010, p.256).

Para refletir e discutir

- 1) O acidente radioativo de Goiânia com o césio-137, ocorrido em 1987, foi um grave episódio que provocou a contaminação de centenas de pessoas. Sabe-se que a meia-vida desse elemento químico é de 30 anos. Quanto restará de uma amostra original de 80 gramas de Cs-137 ao final de 30 anos? E ao final de 90 anos? E após 120 anos?
- 2) Os radioisótopos utilizados nos exames diagnósticos e no tratamento de doenças são chamados de radiofármacos. Por que é importante o bom planejamento na utilização desses medicamentos pelos hospitais e clínicas médicas?
- 3) O iodo-131, utilizado no tratamento da tireoide, tem meia-vida de 8 dias. Quanto tempo levará para que uma amostra decaia para $\frac{1}{4}$ da quantidade original?
- 4) A tomografia por emissão de pósitrons, mais conhecida pela sigla PET (Positron Emission Tomography), é um aparelho para exame de diagnóstico por imagem. Suponha que um laboratório produza, às 8 horas da manhã, 1 miligrama de flúor-18, cuja meia-vida é de 1,8 horas, para que seja utilizado pela PET às 17 horas. Quanto restará de flúor-18 a essa hora da tarde?

(vii) FISSÃO NUCLEAR

Fissão nuclear é o processo pelo qual o núcleo atômico de um átomo pesado se divide em dois núcleos menores, com liberação de muita energia. Na natureza, raramente a fissão nuclear ocorre de forma espontânea. A reação nuclear é provocada bombardeando-se o núcleo alvo com partículas subatômicas (geralmente, o nêutron). Após capturar a partícula subatômica, o núcleo alvo se torna altamente instável e se “quebra” em dois núcleos menores, emitindo grande quantidade de energia.

- Apresentar VÍDEO 12: *Fissão nuclear, nuclear fission* – YouTube.

Duração: 01min35s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=ehL4HoyRqdw>.

No exemplo típico da fissão do urânio-235, a energia que mantém o núcleo unido é liberada, na maior parte, em forma de calor. Além dos dois núcleos menores que se formam, há a liberação de 2 ou 3 nêutrons. Na quebra do urânio-235 representada abaixo, são liberados 1 núcleo de criptônio-91, 1 núcleo de bário-142, 3 nêutrons, calor e radiação:

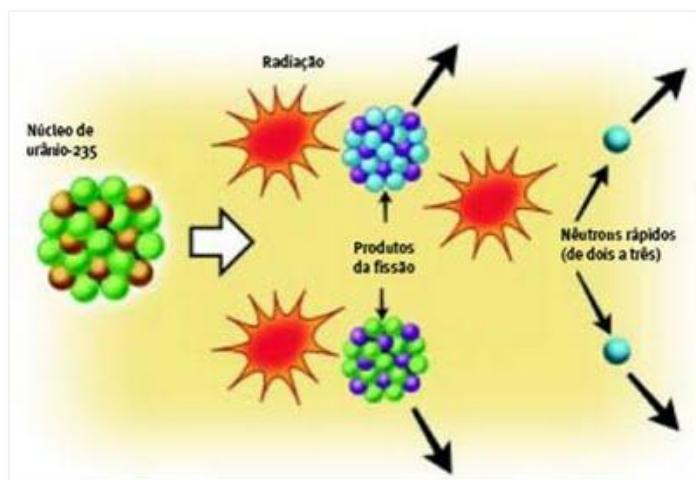
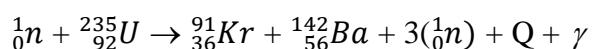


Figura 20: Ilustração da fissão do urânio-235.

Fonte: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf.

Em um processo de fissão, a massa dos fragmentos produzidos mais a dos nêutrons ejetados é menor do que a massa do núcleo original fissionado. A pequena diferença de massa⁴ que falta é convertida em grande quantidade de energia durante a reação, obedecendo à famosa equação de Einstein: $E = mc^2$. A energia liberada na fissão encontra-se principalmente na forma de energia cinética dos núcleos menores produzidos no processo, os quais se afastam uns dos outros e dos nêutrons ejetados a altas velocidades, além de radiação gama. Assim, a fissão nuclear é um processo de liberação de energia (HEWITT, 2011).

- Apresentar **SIMULAÇÃO 4: Fissão Nuclear.**

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission.

(OBS: Escolher a opção “fissão: um núcleo, reiniciar núcleo” e disparar o canhão de nêutrons).

Para refletir e discutir

- 1) O processo de fissão nuclear é mais facilmente realizável em núcleos leves ou em núcleos pesados?
- 2) O que perturba a estabilidade de um radioisótopo, de forma a dar início ao processo de fissão nuclear?
- 3) A fissão nuclear é um processo natural? O que acontece quando um núcleo pesado sofre fissão?
- 4) Os núcleos resultantes da fissão nuclear do urânio-235, o criptônio-91 e o bário-142 sofrem decaimento radioativo?
- 5) A soma das massas dos fragmentos de fissão é igual à massa do núcleo fissionado? O que você sabe a esse respeito?

(viii) REAÇÃO EM CADEIA

A reação em cadeia é uma sequência de fissões autossustentadas com grande liberação de calor, em que os produtos de uma fissão estimulam fissões adicionais. Como os nêutrons não têm carga elétrica, aqueles liberados na fissão do primeiro núcleo não são repelidos pelos

⁴ Em reações de fissão, a quantidade de matéria convertida em energia é cerca de 0,1% (HEWITT, 2011).

núcleos vizinhos. Os nêutrons ejetados incidem, então, em outros núcleos da amostra, causando a fissão de outros átomos e liberando mais nêutrons. Desse modo, a fissão é iniciada e sustentada por nêutrons. Essa sequência de fissões autossustentadas é conhecida como *reação em cadeia*. (HEWITT, 2011).

No processo de fissão típico do urânio-235, são ejetados 2 ou 3 nêutrons. Se houver um grande número de núcleos de urânico-235 na região do entorno, a probabilidade de ocorrerem novas fissões será alta. Assim, esses novos nêutrons causam a fissão de 2 ou 3 átomos, liberando mais energia, mais quatro ou nove nêutrons adicionais. Desse modo, ocorre uma sucessão de fissões com grande liberação de calor, radiação gama e radioisótopos.

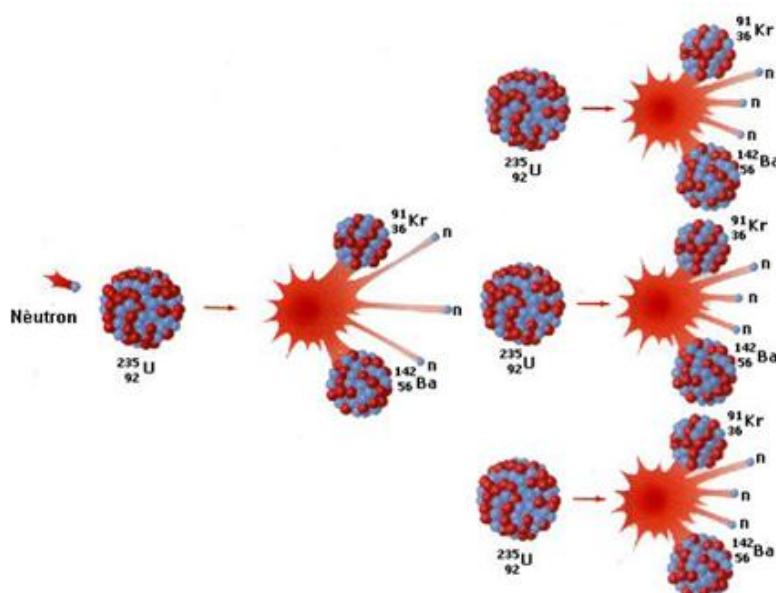


Figura 21: Ilustração da reação em cadeia do urânio-235.

Fonte: <http://www.mundoeducacao.com.br/upload/conteudo/images/fissao-nuclear.jpg>.

- Apresentar **VIDEO 13: Reação em cadeia** – YouTube. Duração: 25 s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=S6vj-Qk2tBk>.

- Apresentar **SIMULAÇÃO 5: Fissão Nuclear**.

(OBS: Escolher a opção “reação em cadeia”, o número de núcleos da coluna de “controles” e, com o *mouse*, direcionar o canhão de nêutrons. Observar quantos núcleos sofrem fissão durante a reação em cadeia. Há ainda a opção de simulação com o uso do “vaso contentor”).

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission.

A reação em cadeia não ocorre naturalmente nas rochas em que a mina de urânio está incrustada, isto porque o urânio existente na natureza é impuro demais para sofrer espontaneamente as reações (HEWITT, 2011).

Para refletir e discutir

- 1) Por que os nêutrons são as partículas mais usadas como projéteis no processo de bombardeio nuclear?
- 2) O que dá início a uma reação em cadeia?

ix) ENERGIA NUCLEAR: O REATOR DE FISSÃO E A BOMBA ATÔMICA

Tanto a bomba atômica quanto um reator de fissão operam segundo o mesmo princípio: a reação em cadeia de núcleos físsveis, com grande liberação de calor; no entanto, esses dispositivos se diferenciam na forma como se procede a reação.

O urânio natural - o elemento químico mais “pesado” - é constituído de uma mistura de três radioisótopos: o urânio-234, em quantidade desprezível em relação ao urânio natural; o urânio-235, em quantidade igual a 0,7% em relação ao urânio natural, e o urânio-238, cuja quantidade corresponde a 99,3% de uma amostra de urânio natural. A fissão ocorre principalmente com o isótopo de urânio-235, enquanto que o urânio-238, o mais abundante, não sofre fissão. Para que ocorra a fissão, é necessário que haja uma quantidade mínima de material físsil, chamada de *massa crítica*, para sustentar a reação em cadeia. Desse modo, torna-se necessário elevar a quantidade de urânio-235 encontrado na natureza, procedimento este conhecido como *enriquecimento do urânio*.

É possível controlar a taxa de fissão nuclear. Os **reatores de fissão** empregados nas usinas atômicas produzem a reação em cadeia autossustentada, uma vez que a taxa de reação é controlada. Neste caso, usa-se um material *moderador* constituído por núcleos leves (geralmente água, água pesada ou grafite), permitindo que o reator trabalhe somente com o fluxo de nêutrons necessário para manter a taxa de reação constante. As barras de controle têm a função de absorver os nêutrons excedentes de circulação. Assim, uma vez iniciada e continuada a reação em cadeia, estabelece-se um equilíbrio, mantendo-se a taxa de reação

desejada. Esses reatores de potência usam como combustível principalmente o urânio-238, enriquecido com cerca de 2% a 4% de urânio-235.

- Apresentar **VÍDEO 14:** *Ciclo do urânio (versão em libras)* – YouTube.

Duração: 06min08s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=1wWFstfkncA>.

Um reator em funcionamento pode ser desligado e, assim, interromper a sequência de fissões nucleares; entretanto, o decaimento radioativo dos núcleos resultantes das fissões continua, visto que é um processo espontâneo e não controlado pelo homem, até que se transformem em isótopos estáveis de chumbo.

- Apresentar **SIMULAÇÃO 6:** *Fissão Nuclear*.

(Escolher a opção “reator nuclear”, com o *mouse* baixar o controlador, disparar nêutrons. Variar a altura do controlador e observar o que acontece. Observar também os gráficos de energia).

Fonte: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission.

A **bomba atômica** é um artefato que produz uma reação em cadeia de forma incontrolável. Uma vez iniciado o processo de fissão, o sistema pode explodir em frações de segundo. No caso de uma bomba atômica, a massa físsil deve ser maior do que a massa crítica para sustentar a reação em cadeia explosiva. Um quilograma de urânio-235 ou de plutônio-239 já possui massa crítica o suficiente para iniciar o processo de fissão explosivo.

- Apresentar **VÍDEO 15:** *Nagasaki Hiroshima new released movie* – YouTube.

Duração: 04min38s.

Fonte: <http://www.youtube.com/watch?v=4BtmT47GbTg>.

Para refletir e discutir

- 1) Que princípio da Física norteia o funcionamento de um reator de fissão de uma usina nuclear e da bomba atômica?

- 2) Que forma de reação em cadeia é produzida em um reator nuclear? E em uma bomba atômica?
- 3) Um reator em funcionamento pode ser desligado, de forma a interromper o a sequência de fissões nucleares? E o que acontece com os núcleos resultantes das fissões, caso o reator nuclear seja desligado?
- 4) Você sabe dizer como a energia nuclear foi apresentada ao mundo?
- 5) Você sabe que combustíveis nucleares foram usados nas bombas atômicas lançadas nas cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, no final da Segunda Guerra Mundial?

5. ATIVIDADE 4

RADIAÇÕES NUCLEARES: EFEITOS, RISCOS E BENEFÍCIOS. APLICAÇÕES NA MEDICINA, INDÚSTRIA, AGRICULTURA, PESQUISA E AMBIENTE

As atividades 4 e 5 envolvem os educandos na apresentação de pesquisas em grupo, cujos temas foram sugeridos ao final da atividade 1. O intuito é proporcionar a autonomia do aluno, a cooperação entre as equipes e o debate produtivo em sala de aula. Os temas que propomos para pesquisa dizem respeito às aplicações da radioatividade em diversas áreas e a eventos relevantes de repercussão mundial.

Historicamente, a energia nuclear tem conotação negativa por causa das bombas atômicas lançadas no final da Segunda Guerra Mundial. Os efeitos nocivos na população japonesa que vivia em Hiroshima e Nagasaki foram devastadores, porém, associar a radiação nuclear à destruição é um erro.

A energia nuclear faz parte de nosso cotidiano, visto que além do uso para a geração de energia elétrica, tem importantes aplicações na área da saúde, na indústria, agricultura, pesquisa e ambiente. Propomos então a atividade 4, para que os alunos apresentem suas pesquisas e discutam sobre as aplicações da radioatividade nos diversos campos, avaliando os seus efeitos, riscos e benefícios.

Papel do professor

O papel do professor é o de conduzir o debate entre os grupos de alunos, incentivar a todos a expor suas ideias, hipóteses e soluções a respeito dos riscos e benefícios do uso da radiação nuclear. Durante as discussões, é fundamental identificar os conteúdos conceituais envolvidos, a fim de se alcançarem os objetivos educacionais. Ao final do debate entre os grupos, vale refletir sobre a seguinte questão: é possível abrir mão da energia nuclear?

Temas das pesquisas para apresentação dos trabalhos em grupo:

Tema 1: Funcionamento básico de um reator e de uma usina nuclear.

Tema 2: Rejeitos radioativos e a sua destinação.

Tema 3: Aplicações da energia nuclear na medicina.

Tema 4: Aplicações da energia nuclear na indústria.

Tema 5: Aplicações da energia nuclear na agricultura.

Tema 6: Datação por carbono-14.

6. ATIVIDADE 5

**AS BOMBAS ATÔMICAS E OS ACIDENTES NUCLEARES E
RADIOATIVOS**

A atividade 5 tem o intuito de despertar no estudante uma atitude crítica com relação ao mundo a sua volta e prepará-lo para o exercício da cidadania, de forma que seja capaz de emitir juízos de valor diante de questões em que a Ciência e a tecnologia envolvem riscos para as pessoas e o meio ambiente.

Para tanto, entendemos que temas como as bombas atômicas lançadas em Hiroshima e Nagasaki e os acidentes nucleares e radioativos de grande repercussão mundial estimulem o debate, de modo a contribuir para a formação de um aluno participativo da sociedade em que vive, com responsabilidades sociais e éticas.

Papel do professor

O papel do professor é promover as discussões entre os alunos durante a apresentação dos trabalhos. Questões como os riscos e os efeitos da utilização da energia nuclear para fins bélicos, a responsabilidade das autoridades e dos cientistas na utilização de tal forma de energia, e a continuidade ou não da exploração nuclear são fundamentais nas discussões entre os grupos de alunos.

Temas das pesquisas para apresentação dos trabalhos em grupo:

Tema 7: O Projeto Manhattan.

Tema 8: As Bombas Atômicas de Hiroshima e Nagasaki.

Tema 9: O acidente nuclear de Chernobyl, Ucrânia (1986).

Tema 10: O acidente radioativo de Goiânia, Brasil (1987).

Tema 11: O acidente nuclear de Three Mile Island, EUA (1979).

7. ATIVIDADE 6

**RETORNO AO PROBLEMA SOCIAL ORIGINAL: CAUSAS E
CONSEQUÊNCIAS DO ACIDENTE RADIOATIVO DE FUKUSHIMA E
AS PERSPECTIVAS DO USO DA ENERGIA NUCLEAR PARA
GERAÇÃO DE ELETRICIDADE**

A retomada das discussões a respeito do acidente radioativo de Fukushima Daiichi permite ao aluno rediscutir os conceitos físicos fundamentais envolvidos no evento, como, também, entender e avaliar com maior profundidade as consequências danosas do despejo de radiação nuclear na população japonesa.

A ideia é apresentar novamente os vídeos da atividade 1, especialmente os vídeos 3, 4 e 5, para que os alunos analisem, sob novo olhar, a sucessão de acontecimentos que culminaram no acidente radioativo. É importante rediscutir os problemas ocorridos nos reatores nucleares, como a radiação escapou para o meio ambiente, quais foram os elementos radioativos lançados na atmosfera e, sobretudo, analisar os conceitos físicos envolvidos com base nos conhecimentos adquiridos. Ao mesmo tempo, o debate busca contribuir para que o aluno pense criticamente sobre a sua responsabilidade social e ética na tomada de decisões na sociedade em que vive.

Em suma, procuramos elaborar o conjunto de atividades da proposta metodológica de forma a mostrar *por que* ensinar radioatividade no Ensino Médio, *o que* ensinar e *como* o professor pode trabalhar os conteúdos conceituais em sala de aula. Para isso, pesquisamos diversos materiais didático-pedagógicos acessíveis, como vídeos, experimentos virtuais, artigos e livros na área de ensino de Ciências. A seleção das simulações e dos vídeos sugeridos no desenvolvimento das atividades despendeu longas horas de pesquisa, visto que procuramos recursos com informações corretas e com duração de poucos minutos. Julgamos também importante destacar as referências que foram utilizadas em cada atividade da sequência didática, acrescidas de sugestões para as pesquisas em grupo (Cf. Referências da sequência didática).

É importante salientar que a sequência didática aqui apresentada não é uma receita a ser seguida, e sim, uma proposta de ensino de radioatividade, que pode ser ampliada. Com este trabalho, esperamos dar subsídios ao professor do Ensino Médio, como, também, contribuir para o ensino da Física.

REFERÊNCIAS DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

ATIVIDADE 1

ACRO - *Centrale Nucléaire de Fukushima Dai-ichi: Reconstitution des évènements.* Relatório. Disponível em: <http://www.acro.eu.org/chronoFukushima2.html>. Acesso em: 03 nov. 2012.

BIELLO, D. Destino de usina nuclear do Japão é incerto. *Scientific American Brasil*. São Paulo: Duetto Editorial, 2011. Disponível em:
http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/destino_de_usina_nuclear_no_japao_e_incerto.html. Acesso em: 06 nov. 2012.

BOILLEY, D. *Emergency planning and evacuation. Lessons from Fukushima*: Relatório do Greenpeace Internacional. Amsterdam: 28 de fevereiro de 2012. Disponível em:
<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/nuclear/2012/Fukushima/Lessons-from-Fukushima.pdf>. Acesso em: 12 out. 2012.

GUNDERSEN, A. *The Echo Chamber: Regulatory Capture and the Fukushima Daiichi Disaster. Lessons from Fukushima*: Relatório do Greenpeace Internacional. Amsterdam: 28 fev. 2012. Disponível em:
<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/nuclear/2012/Fukushima/Lessons-from-Fukushima.pdf>. Acesso em: 12 out. 2012.

MATSON, J. Resumo de fatos da radiação em Fukushima. *Scientific American Brasil*. São Paulo: Duetto Editorial, 2011. Disponível em:
http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/resumo_de_fatos_sobre_a_radiacao_em_fukushima.html. Acesso em: 06 nov. 2012.

PIORE, A. Planejando o cisne negro. *Scientific American*, edição especial, n. 42, p. 6-11, 2011.

SOARES, L. *Lições do acidente de Fukushima*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, aula inaugural, Rio de Janeiro, 2011.

Referências dos vídeos

VÍDEO 1. *Terremoto no Japão - Jornal Nacional 11-03-2011*. YouTube. 03min50s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=LaJeyqYQl5g>. Acesso em: 02 jul. 2013.

VÍDEO 2. *Tsunami Japan real video 2 compilation*. YouTube. 03min02s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=y0ajWtrs3YY>. Acesso em: 24 jul. 2013.

VÍDEO 3. *Entenda o problema nos reatores de Fukushima*. YouTube. 01min12s: son., color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZUYqGLUIxSY>. Acesso em: 14 jan. 2013.

VÍDEO 4. *Terremoto no Japão: cresce a preocupação com as usinas nucleares*. YouTube. 04min13s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=e93Ke5ktbHU>. Acesso em: 27 nov. 2012.

VÍDEO 5. *Japão: consequências da radiação*”. YouTube. 03min05s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=z9p5oVuFwu0>. Acesso em: 12 out. 2012.

Referências de vídeos complementares

DAY when tsunami struck - Japan 2011. YouTube. 19min58s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=eeLlySDmjuw>. Acesso em: 27 nov. 2012.

MAPA de visualizacion de todos los terremotos de 2011 em Japón. YouTube. 09min57s: color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=aeCb8QVHL4o>. Acesso em: 29 nov. 2012.

ATIVIDADE 2

FUCHS, A. R. *A física moderna*. Tradução: Normando Celso Fernandes e Alberto Luís da Rocha Barros. São Paulo: Polígono, 1972, 359 p..

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Tradução: Trieste Freire Ricci. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011, 744 p..

MARTINS, R. de A. *A descoberta da radioatividade*. Campinas: [s.n.], 1998. Disponível em: <http://www.ghtc.usp.br/server/pdf/ram-59.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2012. Artigo científico.

_____. *Becquerel e a descoberta da radioatividade: uma análise crítica*. Campina Grande: Editora da Universidade Estadual da Paraíba; São Paulo: Livraria da Física, 2012, 482 p..

OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007, 81p..

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. *Física das radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 296 p..

Referências dos vídeos

VÍDEO 6. *Crookes Maltese Cross tube*. YouTube. 00min41s: color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=Xt7ZWEDZ_GI. Acesso em: 22 out. 2012.

VÍDEO 7. *Descoberta do elétron*. YouTube. 04mi20s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen>. Acesso em: 22 out. 2012.

VÍDEO 8. *Rayos catódicos*. YouTube. 02min: color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=1dPv5WKBz9k&feature=endscreen&NR=1>. Acesso em: 22 out. 2012.

VÍDEO 9. *Ponto Ciência – Experimento de Becquerel*. YouTube. 06min47s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=Do-p-GdWUc0>. Acesso em: 09 jul. 2013.

ATIVIDADE 3

CARDOSO, E. M. *Programa de integração CNEN- PIC*: módulo de informação técnica. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

CARDOSO, E. M. et al. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

EVOLUÇÃO dos modelos atômicos. [S.I.: s.n., 200-]. Disponível em: http://www.iq.ufrgs.br/ead/fisicoquimica/modelosatomicos/modelo_dalton.html. Artigo científico.

FARIA, S. L. *O que é radioatividade*. São Paulo: Editora Brasiliense, 1989, 72 p..

FUCHS, W. R. *Física moderna*. Tradução de Normando Celso Fernandes e Alberto Luís da Rocha Barro. São Paulo: Polígono, 1972, 359 p..

FUSINATO, P. A.; PEREIRA, R. F.. *A inserção de física moderna e contemporânea (FMC) no ensino médio: cursos teóricos, produção de oficinas e de unidades didáticas (2010-2011)*. Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2011.

GONÇALVES, O. D.; ALMEIDA, I. P. S.. A energia nuclear e seus usos na sociedade. *Ciência Hoje*, v. 37, n. 220, 2005, p. 36-44. Disponível em: http://cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2005/220/pdf_aberto/nuclear.pdf. Acesso em: 26 set. 2011.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Tradução de Trieste Freire Ricci. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011, 768 p..

OKUNO, E. *Radiação: efeitos, riscos e benefícios*. São Paulo: HARBRA, 2007, 81 p..

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. *Física das radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 296 p..

PIETROCOLA, M. et al.. *Física em contextos: pessoal, social, histórico*. São Paulo: FTD, 2010. v. 3.

SAFFIOTI, W. *Fundamentos de energia nuclear*. Petrópolis: Vozes, 1982, 177 p..

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Tradução: Ronaldo Sergio de Biasi. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2006, 515 p..

Referências dos vídeos

VÍDEO 10. *Vídeo – Experimento de Rutherford*. YouTube. 04min08s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=tw1-4TlrcwU>. Acesso em: 09 jul. 2013.

VÍDEO 11. *Tipos de radiação: partícula alfa, beta e radiação gama*. YouTube. 02min09s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=N1TMhRKiOBk>. Acesso em: 09 jul. 2013.

VÍDEO 12. *Fissão nuclear, nuclear fission*. YouTube. 01min36s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=ehL4HoyRqdw>. Acesso em: 08 jul. 2013.

VÍDEO 13. *Reação em cadeia*. YouTube. 00min25s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=S6vj-Qk2tBk>. Acesso em: 16 abr. 2013.

VÍDEO 14. *Ciclo do urânio (versão em libras)*. YouTube. 06min08s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=1wWFstfkncA>. Acesso em: 16 jan. 2013.

VÍDEO 15. *Nagasaki Hiroshima new released movie* – YouTube. 04min38s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=4BtmT47GbTg>. Acesso em: 08 jul. 2013.

Referências das simulações

DECAIMENTO alfa. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/alpha-decay. Acesso em: 14 jul. 2013.

DECAIMENTO beta. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/beta-decay. Acesso em: 14 jul. 2013.

FISSÃO nuclear. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/nuclear-fission. Acesso em: 14 jul. 2013.

MONTE um átomo. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/build-an-atom. Acesso em: 14 jul. 2013.

PHET – INTERACTIVE SIMULATIONS. University of Colorado at Boulder. Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/. Acesso em: 14 jul. 2013.

ATIVIDADE 4:

Sugestões de referências para pesquisa em grupo

CARDOSO, E. M. et al. *Aplicações da energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]a. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/aplica.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Programa de integração CNEN- PIC*: módulo de informação técnica. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]b. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

MERÇON, F. *Radiações*: riscos e benefícios. [S.I., s.n., 200-]. Disponível em: http://web.ccead.pucrio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/SL_radiacoes_riscos_e_beneficios.pdf. Acesso em: 13 fev. 2013.

OKUNO, E. *Radiação*: efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: HARBRA, 2007, 81 p..

PEZZO, M. Datação por carbono-14. *Univerciencia*, dez. 2002, p 4-6. Disponível em: http://www.univerciencia.ufscar.br/n_2_a1/carbono.pdf. Acesso em: 21 jul. 2013.

SILVA, M. R. *Investigando as aplicações da radioatividade na sociedade*. Curitiba, 2008. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/970-2.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2013.

Referências de alguns vídeos para auxiliar nas pesquisas das equipes:

BENEFÍCIOS da radioatividade na agricultura. YouTube. 02min42s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=IzkLm_Fl8IY. Acesso em: 21 jul. 2013.

ENERGIA nuclear. YouTube. 03min27s: son., color. Disponível em:
<http://www.youtube.com/watch?v=uS7WJ0pl9Po>. Acesso em: 21 jul. 2013.

ENERGIA nuclear e seus benefícios. YouTube. 02min53s: son. Color. Disponível em:
http://www.youtube.com/watch?v=AyMp_uMebHY. Acesso em: 21 jul. 2013.

LIXO radioativo – YouTube. 02min57s: son., color. Disponível em:
<http://www.youtube.com/watch?v=AG3FES8onOk>. Acesso em: 21 jul. 2013.

MEDICINA nuclear – Paulo Schiavon. YouTube. 01min40s: son., color. Disponível em:
http://www.youtube.com/watch?v=SnZr7MwS_vo. Acesso em: 21 jul. 2013.

TOMOGRAFIA por emissão de pósitrons. YouTube. 01min31s: son., color. Disponível em:
<http://www.youtube.com/watch?v=dh7lJKQTvhE>. Acesso em: 21 jul. 2013.

ATIVIDADE 5

Algumas referências para auxiliar as pesquisas em grupo:

BITTENCOURT, A. M.. *Césio 137: relatos da segunda geração do maior acidente radiológico da história*. Bauru: [s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.uel.br/grupo-pesquisa/gepal/primeirosimposio/completos/alexandrebittencourt.pdf>. Acesso em: 03 set. 2011. Artigo científico.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eletrobrás – Eletronuclear: *Análise histórica de acidentes nucleares: o acidente de Three Mile Island – Unidade 2 (TMI-2)*. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v06_12_analise.html. Acesso em: 21 jul. 2013.

CARDOSO, E. M. *Programa de integração CNEN- PIC*: módulo de informação técnica. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>. Acesso em: 26 set. 2011.

CARDOSO, E. M. et al. *Energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, 2005. Disponível em:
<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

_____. *Radioatividade*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em:
<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/radio.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

CHEMELLO, E. *Césio-137: a tragédia radioativa do Brasil*. Disponível em:
<http://www.quimica.net/emiliano/artigos/2010agosto-cesio137.pdf>. Acesso em: 03 set. 2011.

GOIÁS. Secretaria de Estado da Saúde de Goiás. *A história do acidente radioativo em Goiânia*. Goiânia: 2013. Disponível em:
<http://www.saude.go.gov.br/index.php?idMateria=85873>. Acesso em: 03 set. 2013.

GREENPEACE. *Acidente em Three Mile Island*. [S.I., 2009]. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Blog/acidente-em-three-mile-island/blog/761/>. Acesso em: 21 jul. 2013.

MARTINS, J. B. *História da energia nuclear*. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN. Apostilas educativas. Rio de Janeiro: CNEN, [200-]. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/historia.pdf>. Acesso em: 26 set. 2011.

MOURÃO, R. R. F. Hiroshima e Nagasaki: razões para experimentar a nova arma. *Scientiae Studia*, v. 3, n. 4, 2005, p. 683-710. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ss/v3n4/a10v3n4.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2012.

NAKAZAWA, K. *Gen pés descalços*: uma história de Hiroshima. Tradução: Sofia Valtas. 4. ed. São Paulo: Conrad Editora do Brasil Ltda., 2002, 4 volumes.

SULEIDE - SUPERINTENDÊNCIA LEIDE DAS NEVES FERREIRA. Secretaria da Saúde do Estado de Goiás. *Césio-137*: saiba como ocorreu o acidente - a história, fatos e relatos. Goiânia: 2012. Disponível em: <http://www.cesio137goiania.go.gov.br/index.php?idEditoria=3823>. Acesso em: 03 set. 2013.

THE NATIONAL MUSEUM OF NUCLEAR SCIENCE & HISTORY. *The Manhattan Project*. Albuquerque, EUA. Disponível em: <http://www.nuclearmuseum.org/see/online-museum/history/the-manhattan-project/>. Acesso em: 28 fev. 2013.

Referências de alguns vídeos para auxiliar nas pesquisas das equipes:

CIENTISTAS explicam os efeitos da radiação no corpo humano e no meio ambiente – Jornal Nacional. YouTube. 03min37s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=I7XUwpQ_PKM. Acesso em: 09 jul. 2013.

COMO foi o acidente nuclear com o césio-137 no Brasil. YouTube. 07min38s: son., color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=6gK8Svm_gpc. Acesso em: 19 jul. 2013.

DISCOVERY Channel - hora zero - o desastre de Chernobyl. YouTube. 46min43s: son. (leg.), color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=FcrkF78DhR8>. Acesso em: 19 jul. 2013.

DOCUMENTÁRIO – Hiroshima - o dia seguinte // NatGeo. YouTube. 45min10s: son. (leg.), color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=Dyt7bs4cNXY>. Acesso em: 13 set. 2012.

EFEITOS da radiação. YouTube. 10min28s: son. Color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=MquDgivy70E>. Acesso em: 09 jul. 2013.

ENTENDA o acidente nuclear de Chernobyl. YouTube. 10min29s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=9-uDPiNVBlA>. Acesso em: 19 jul. 2013.

FANTÁSTICO 1979 – Acidente nuclear nos EUA. YouTube. 05min01s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=awGlX6arnXo>. Acesso em: 19 jul. 2013.

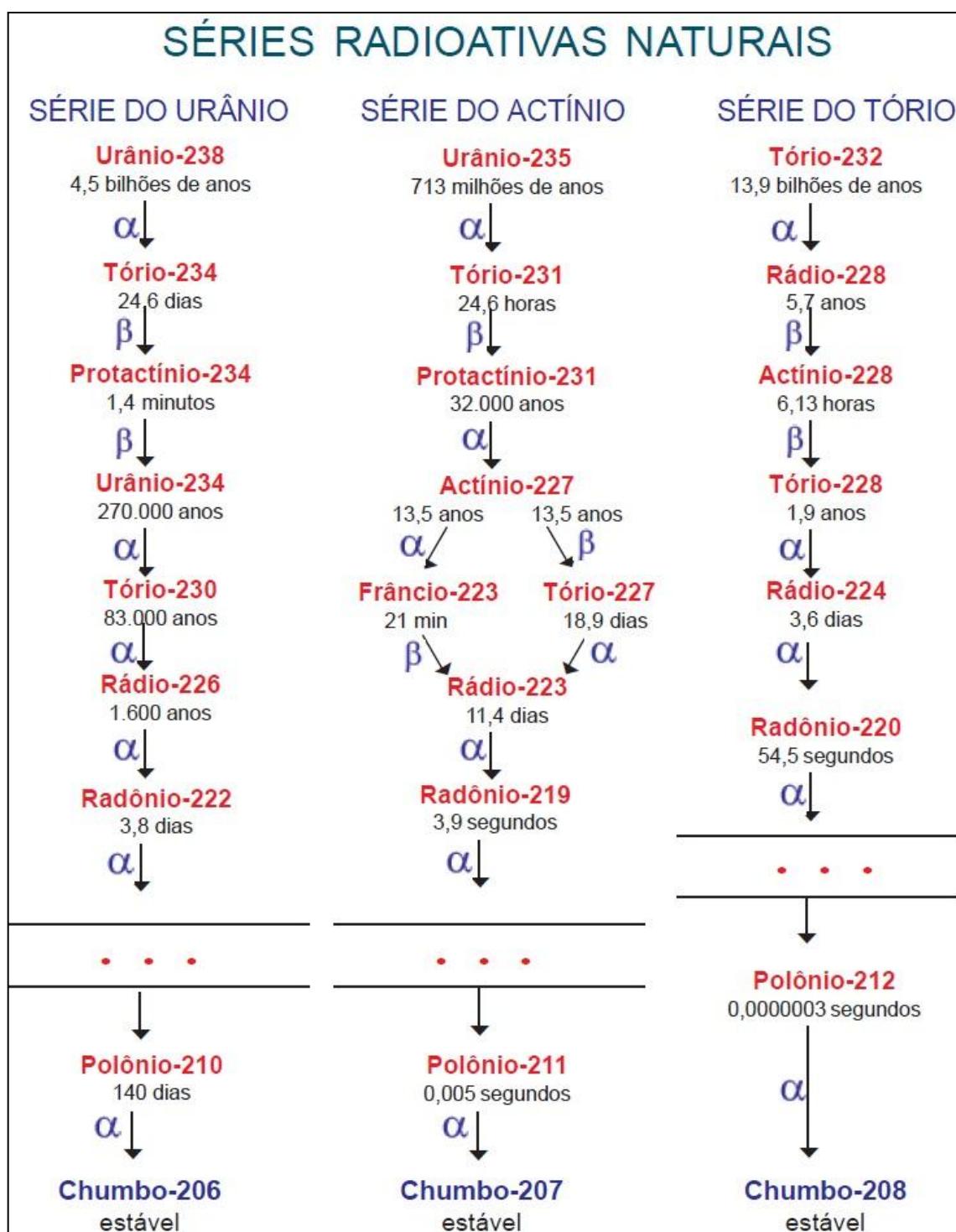
GEN pés descalços legendado PT-BR. YouTube. 10min55s: son. (leg.), color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=FHYCSHEldSA>. Acesso em: 09 jul. 2013.

LINHA Direta Justiça – Césio 137. YouTube. 37min39s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=MfshO3PvIYs>. Acesso em: 19 jul. 2013.

THE History Channel - Maravilhas modernas "Projeto Manhattan". YouTube. 44min14s: son., color. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=v9pYDa6U-Fo>. Acesso em: 22 mar. 2013.

TOP 10 bombas nucleares/nuclear bombs. YouTube. 08min06s: son. Color. Disponível em: http://www.youtube.com/watch?v=e7Jjw0y_2kM. Acesso em: 08 jul. 2013.

SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS



Fonte: Cardoso [200-b, p. 13].