

**UNIVERSIDADE SAGRADO CORAÇÃO**

**CARLOS EDUARDO DA SILVA**

**RADIOATIVIDADE E ENERGIA NUCLEAR:  
APLICAÇÕES, IMPLICAÇÕES E EXPLICAÇÕES**

BAURU  
2010

**CARLOS EDUARDO DA SILVA**

**RADIOATIVIDADE E ENERGIA NUCLEAR:  
APLICAÇÕES, IMPLICAÇÕES E EXPLICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro de Ciências Exatas e  
Sociais Aplicadas como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Química, sob a orientação do Prof. Ms.  
Dorival Roberto Rodrigues.

BAURU  
2010

S5862r

Silva, Carlos Eduardo da

Radioatividade e energia nuclear: aplicações, implicações e explicações / Carlos Eduardo da Silva -- 2010.

45f. : il.

Orientador: Prof. Ms. Dorival Roberto Rodrigues.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Química) - Universidade Sagrado Coração - Bauru - SP.

1. Radioatividade. 2. Energia nuclear. 3. Ciência. I. Rodrigues, Dorival Roberto. II. Título.

**CARLOS EDUARDO DA SILVA**

**RADIOATIVIDADE E ENERGIA NUCLEAR: APLICAÇÕES,  
IMPLICAÇÕES E EXPLICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Química, sob a orientação do Prof. Ms. Dorival Roberto Rodrigues.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dra. Terlize Cristina Niemeyer (Titular)

---

Prof. MS. Alessandra Bizan de Oliveira Stetner (Titular)

---

Prof. MS. Setsuko Sato (Suplente)

Bauru, 26 de novembro de 2010.

*Dedico este trabalho,*

*Principalmente aos meus pais, que sempre me incentivaram a praticar o bem, em todos os momentos da minha vida.*

*aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado durante esta jornada*

*e a DEUS por me conceder este momento especial.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que sempre esteve ao meu lado durante todos os momentos da minha vida, sempre me conduzindo em direção aos melhores caminhos.

Agradeço aos meus pais, por sempre me incentivar a estudar e nunca desistir dos meus sonhos, além de sempre acreditar que este momento se concretizaria.

Ao meu orientador, Prof. Ms. Dorival Roberto Rodrigues que além de ter me ajudado a superar mais esta etapa, se mostrou ao longo de todo o curso, extremamente competente nas suas atribuições.

Agradeço também a Márcia Valadão, uma pessoa muito especial e companheira, que esteve ao meu lado nesses 5 anos da faculdade e que me deu muito apoio na realização deste sonho.

Ao meu amigo Géferson Cristiano Galdino de Lima, uma pessoa com a qual dividi os melhores momentos da vida, desde a pré escola até a Universidade.

E a todas as pessoas que acreditaram no meu potencial e que de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

## RESUMO

O presente trabalho descreve o histórico da descoberta e do desenvolvimento dos conceitos de radioatividade que se estabeleceram ao longo de décadas de estudos, realizados por grandes pesquisadores e ícones na história da ciência. Destaca as principais aplicações da radioatividade nas mais diversas áreas do conhecimento humano e apresenta uma visão crítica sobre a sua utilização nos dias atuais. Com a descoberta dos raios X pelo físico alemão Röntgen, em 1895, iniciou-se uma grande revolução no meio científico. Pesquisadores do mundo inteiro se lançaram em uma busca por respostas, onde o principal objetivo era descobrir a natureza dos raios X. A partir daí, grandes descobertas se sucederam, dentre elas, a da radioatividade espontânea, em 1896, pelo químico francês Henri Becquerel. O termo radioatividade significa atividade de emitir raios e foi introduzido em 1897 pela cientista polonesa Marie Skłodowska, outra grande pesquisadora da época. Os estudos com o objetivo de entender os fenômenos radioativos e a incessante busca pelo conhecimento trouxeram grandes avanços, principalmente na química e na medicina. Hoje, a radioatividade possui um vasto campo de aplicação tecnológica. A maior delas está na medicina, onde é usada no diagnóstico de doenças e no tratamento do câncer. A energia nuclear surge como uma alternativa à substituição dos combustíveis fósseis na geração de energia elétrica. No entanto, as aplicações da energia nuclear se estendem para outros fins, como a fabricação de artefatos de guerra e de destruição. Nos últimos anos, presenciamos uma forte discussão sobre a questão da utilização da energia nuclear. Diante de tantas preocupações, pode-se dizer que o uso da radioatividade pode se estabelecer como uma importante fonte de benefícios para as gerações futuras, como também pode ser a causadora de grandes conflitos, resultando em perdas irreparáveis para a sociedade.

**Palavras-chave:** Radioatividade. Energia nuclear. Ciência.

## **ABSTRACT**

This study aims to explain the discovery and development of concepts of radioactivity that were established over decades of studies, conducted by great researchers and icons in the history of science. Highlights the main applications of radioactivity in various areas of human knowledge and presents a critical view of its use today. With the discovery of X-rays by German physicist Röntgen in 1895, started a great revolution in scientific circles. Researchers worldwide have searched for answers, where the main goal was to discover the nature of X-rays. Since then, major discoveries followed, among them, the spontaneous radioactivity in 1896 by the French chemist Henri Becquerel. The term radioactivity means the activity of emitting rays and it was introduced in 1897 by the Polish scientist Marie Skłodowska, another major researcher of the time. Studies aiming to understand the radiation phenomena and the incessant search for knowledge brought great advances, mainly in chemistry and medicine. Today, the radioactivity has a wide area of technological application. The largest of these is in medicine where it is used in disease diagnosis and treatment of cancer. Nuclear energy is an alternative to replace fossil fuels in generating electricity. However, applications of nuclear energy extend to other purposes, such as the manufacture of weapons of war and destruction. In recent years witnessed a strong debate on the issue of use of nuclear energy. With so many concerns, one can say that the use of radioactivity can be established as an important source of benefits for future generations, but can also be a cause of great conflicts, resulting in irreparable losses to society.

**Keywords:** Radioactivity. Nuclear energy. Science.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Primeira radiografia.....	11
Figura 2 -	Dispositivo idealizado por Rutherford para estudar os diferentes tipos de radiações.....	15
Figura 3 -	Capacidade de penetração das partículas alfa, beta e gama.....	16
Figura 4	Experimento fundamental para descoberta do núcleo atômico.....	18
Figura 5	Transmutação por reação nuclear.....	23
Figura 6	Desenho esquemático de um ciclotron.....	24
Figura 7	Vista aérea do Laboratório Acelerador LHC, na Suíça.....	25
Figura 8	Sol, um reator de fusão natural.....	26
Figura 9	Fissão Nuclear.....	27
Figura 10	Esquema de Ultracentrífuga.....	31
Figura 11	Projeto usado em bombas atômicas.....	33
Figura 12	Varetas de combustível.....	35
Figura 13	Núcleo do reator.....	36
Figura 14	(a) Projeto básico de uma usina de energia nuclear (b) Uma usina de energia nuclear em Salem, Nova Jersey.....	37
Figura 15	Mapeamento da tireóide.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades da radiação alfa, beta e gama.....	16
Tabela 2	As meia-vidas e tipo de decaimento para vários radioisótopos.....	21

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	O INÍCIO DE UMA GRANDE REVOLUÇÃO.....	10
1.2	A DESCOBERTA DA RADIOATIVIDADE POR BECQUEREL.....	11
1.3	A GRANDE CONTRIBUIÇÃO DO CASAL CURIE.....	13
1.4	A NATUREZA DAS RADIAÇÕES.....	14
1.5	A DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO.....	17
1.6	DECAIMENTO RADIOATIVO ESPONTÂNEO.....	18
1.7	MEIA-VIDA DE UM RADIOISÓTOPO.....	20
<b>2</b>	<b>REAÇÕES NUCLEARES</b> .....	22
2.1	EQUAÇÕES DE DECAIMENTO RADIOATIVO.....	22
2.2	TRANSMUTAÇÃO NUCLEAR.....	23
2.3	FUSÃO NUCLEAR.....	25
2.4	FISSÃO NUCLEAR.....	26
<b>3</b>	<b>ARMAMENTO NUCLEAR</b> .....	29
3.1	A BOMBA ATÔMICA.....	29
3.2	ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO.....	30
3.3	CENTRÍFUGAS.....	30
3.4	FUNCIONAMENTO DA BOMBA.....	32
<b>4</b>	<b>USINAS NUCLEARES</b> .....	34
4.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	34
4.2	COMBUSTÍVEL.....	34
4.3	CONTROLE DA REAÇÃO DE FISSÃO.....	35
4.4	A SEGURANÇA DOS REATORES NUCLEARES.....	37
4.5	PRÓS E CONTRAS.....	38
<b>5</b>	<b>USOS MEDICINAIS</b> .....	40
5.1	RADIOTERAPIA PARA CÂNCER.....	40
5.2	RADIOLOGIA DIAGNÓSTICA.....	41
5.3	MAPEAMENTO DE ÓRGÃOS COM RADIOISÓTOPOS.....	41
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	43
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso da Radioatividade para fins pacíficos tem sido cada vez mais abrangente nas diversas áreas do conhecimento humano. No tratamento do câncer através da radioterapia, deu-se nova esperança de vida a milhões de pessoas. Numa eventual situação de racionamento de energia, em virtude do esgotamento de suas fontes, a energia nuclear pode ser uma alternativa viável e de grande utilidade. No entanto, a aplicação da radioatividade nos dias atuais, não se limita ao uso para fins pacíficos. O desenvolvimento da primeira bomba atômica em 1945 pelos americanos desencadeou um processo que até hoje gera discussões sobre a obtenção e utilização da energia nuclear. O uso da radiação para a obtenção de um serviço (como energia elétrica) ou de um produto (como armas nucleares) produz resíduos, denominados lixo nuclear, que podem oferecer um enorme risco à população e ao meio ambiente.

Atualmente, a população ainda sofre as conseqüências de acidentes nucleares acontecidos décadas atrás, como o de Three Mile Island nos Estados Unidos, em 1979 e Chernobyl na Ucrânia, em 1986, acidentes que causaram danos irreparáveis.

Estamos expostos à radioatividade constantemente, na sua maior parte radiação natural, que vem do espaço. No entanto, existem outras formas de exposição, principalmente tratamentos médicos, dentre eles os raios X.

Esta pesquisa bibliográfica tem por objetivo além de uma descrição histórica da descoberta e do desenvolvimento dos conceitos de radioatividade, apresentar uma discussão sobre a utilização da radioatividade e da energia nuclear para fins bélicos, medicinais e de obtenção de energia elétrica, assim como apresentar uma visão crítica da utilização deste recurso energético.

### 1.1 O INÍCIO DE UMA GRANDE REVOLUÇÃO

Segundo Passos e Sousa (2010) as pesquisas sobre a radioatividade foram iniciadas com a descoberta dos raios X, pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen em 1895. Röntgen descobriu um tipo de radiação que atravessava corpos opacos, constituídos de elementos mais leves como hidrogênio e oxigênio, porém era barrado por elementos mais pesados como o cálcio presente nos ossos. Estes raios

apresentavam propriedades de excitação de substâncias fosforizantes ou fluorescentes, impressionavam placas fotográficas e aumentavam a condutividade elétrica do ar que atravessavam (ionização). Como eram de natureza desconhecida, foram denominados raios X.

“Em 22 de dezembro de 1895, Röntgen tirou a primeira radiografia de que se tem notícia. Trata-se da radiografia da mão de sua esposa, Anna Bertha Ludwig, na qual se pode observar os ossos e um anel em um dos dedos”. (PASSOS; SOUSA, 2010, p.14-15)



**Figura1** – Primeira radiografia: mão com anel, 1895  
**Fonte:** PASSOS; SOUSA, 2010, p.15

De acordo com Strathern (2000) em 1896 Röntgen publicou um artigo descrevendo sua impressionante descoberta que despertou o interesse de vários cientistas da época, causando uma verdadeira revolução no meio científico. Meses depois, a novidade já era usada nas clínicas médicas e Röntgen tornou-se o pai da radiologia médica. Em 1901 Röntgen recebeu o primeiro prêmio Nobel em Física por seus estudos. Poderia ter ficado rico, mas morreu pobre aos 77 anos, pois se recusou a patentear qualquer coisa relacionada às suas descobertas por que acreditava que elas deveriam ser aproveitadas para o benefício da humanidade.

## 1.2 A DESCOBERTA DA RADIOATIVIDADE POR BECQUEREL

Em meio à nova revolução científica em consequência da descoberta de Röntgen, o químico francês Antoine Henri Becquerel deu início aos seus estudos que levaram à descoberta da radioatividade. Becquerel descendia de uma família de cientistas. Seu avô, Antoine Cesar Becquerel fora um pioneiro da eletroquímica e seu pai, o físico Alexandre Edmond Becquerel ficou conhecido por seus trabalhos

sobre luminescência e fosforescência e pela descoberta do efeito fotoelétrico (célula solar). (MARTINS, 1990)

Impulsionado por hipóteses levantadas por outros pesquisadores e por causa das pesquisas feitas anteriormente por seu pai, Becquerel passou a questionar-se sobre a possibilidade de materiais fluorescentes produzirem raios X também. Seu pai havia acumulado muitos materiais fluorescentes, dentre eles o sulfato duplo de potássio e uranila  $[K_2UO_2(SO_4)_2]$ , com o qual realizou sua pesquisa. Percebeu que o sal, exposto a luz do sol para induzir a fluorescência, era capaz de sensibilizar o negativo de um filme fotográfico recoberto por papel preto ou ainda por uma lâmina de metal fina, chegando à conclusão de que os materiais fluorescentes produziam raios X. (PASSOS; SOUSA, 2010)

Atualmente, sabemos que não existe relação direta entre a emissão de raios X e a luminescência ou fluorescência. No entanto, o estudo aprofundado sobre o tema e a criação de hipóteses relacionadas a tal fenômeno, foram essenciais para a descoberta da radioatividade e do próprio núcleo atômico. (MARTINS, 1990)

Segundo Strathern (2000) as experiências de Becquerel continuaram, porém tiveram que ser interrompidas por alguns dias devido ao tempo nublado e chuvoso. Becquerel guardou cuidadosamente os materiais em uma gaveta onde não havia passagem de luz. Depois de alguns dias, ainda sem a luz do sol, Becquerel resolve revelar duas das chapas que estavam na gaveta, mesmo acreditando ser improvável a emissão de luminescência pelos cristais, visto que não haviam sido expostos a luz do sol. Ao revelar a primeira chapa, se deparou com uma situação inusitada, os sais de urânio haviam escurecido a chapa fotográfica mesmo sem terem sido expostos à luz solar, ou seja, essa radiação não envolvia a luz do sol e nenhum tipo visível de fluorescência, pois o cristal não estivera brilhando no escuro. Becquerel havia descoberto a radioatividade. Ainda assim, insistia na idéia de que essa radiação pudesse ser um tipo de fluorescência invisível, mas logo foi comprovado que o sal de urânio era capaz de emitir radiação espontaneamente. Em março de 1896, Becquerel faz uma comunicação à Academia de Ciências de Paris, descrevendo que os efeitos inesperados só poderiam ser devidos a uma radiação espontânea proveniente do urânio.

Martins (1990) destaca que apesar da descoberta de Becquerel, apenas a partir de 1898 o estudo da radioatividade começou realmente a se desenvolver. A natureza das radiações emitidas pelos corpos radioativos começou a ser esclarecida

por Marie Curie e seu marido Pierre Curie, mostrando que não se tratavam de raios X.

### 1.3 A GRANDE CONTRIBUIÇÃO DO CASAL CURIE

Polonesa, Maria Sklodowska estudou na Sorbonne (Universidade de Paris), onde se formou em física e matemática, casou-se com o físico francês Pierre Curie, passando a se chamar Marie Sklodowska Curie e formou com seu marido uma das parcerias mais brilhantes de que se tem notícia na história da ciência. Estava prestes a iniciar sua tese de doutorado em 1897 e a descoberta de Becquerel despertou profundo interesse. Decidiu então que o tema seria o estudo da natureza dos “raios de Becquerel”, nome que havia sido dado até então a radioatividade. (OKUNO, 2007)

Segundo Strathern (2000) Marie Curie com o auxílio de Pierre, iniciou sua pesquisa com diferentes compostos de urânio, repetindo algumas das experiências de Becquerel. Após alguns estudos chegou à conclusão de que independentemente do composto utilizado, somente a quantidade de urânio afetava a intensidade da radiação. Portanto, a propriedade de emitir radiação pertencia aos próprios átomos de urânio. Não demorou muito para Marie se questionar sobre a possibilidade de outros átomos possuírem as mesmas propriedades. Após outros experimentos, descobriu que o tório também emitia radiação. A esse fenômeno propôs o nome de “radioatividade” que significa atividade de emitir raios. O nome foi tão bem aceito que substituiu o termo raios de Becquerel.

O casal Curie utilizava em suas pesquisas principalmente a pechblenda, um minério que se apresentava mais radioativo que os outros, de onde retiravam o urânio necessário para as experiências. Ao purificar o minério, observaram que uma fração das impurezas extraídas se apresentava mais radioativa que o próprio urânio. Esse fato levou o casal Curie a acreditar na possibilidade da existência de um elemento novo, até então desconhecido. (PASSOS; SOUSA, 2010)

Pierre Curie decidiu abandonar quaisquer outros estudos e juntou-se à sua esposa, pois sabia que Marie estava prestes a fazer uma grande descoberta. Pierre estava certo, em 1898, o casal conseguiu uma quantidade suficiente de minério, contendo o novo elemento, não foi possível isolá-lo, pois no minério havia outro elemento quase idêntico, o bismuto. Ao novo elemento propuseram o nome polônio,

em homenagem ao país de origem de Marie. Após alguns estudos específicos, descobriram que o polônio era cerca de 400 vezes mais radioativo que o urânio. Escreveram um artigo reportando sua descoberta “sobre uma nova substância radioativa contida na pechblenda”. Essa foi a primeira vez que a palavra “radioativa” foi publicada. No entanto a descoberta desse novo elemento ainda não era capaz de explicar o alto nível de radiação presente na pechblenda. Mais tarde, conseguiram isolar uma substância ainda mais radioativa que o polônio, e através de uma análise espectroscópica, feita pelo químico Eugene Demarçay, verificaram a presença de linhas espectrais novas, o que comprovava a existência de um elemento novo. A esse elemento deram o nome rádio, por ser muito mais radioativo que o urânio e o polônio. O rádio hoje é amplamente utilizado em tratamentos médicos, principalmente no combate ao câncer. (STRATHERN, 2000)

Em 1903, Marie e Pierre Curie dividiram o prêmio Nobel em física, juntamente com Becquerel por seus estudos dos fenômenos da radiação. Marie Curie foi a primeira mulher a ganhar o prêmio, foi também a primeira pessoa a receber mais de um prêmio Nobel, pois em 1911, recebeu o Nobel em química pela descoberta dos elementos polônio e rádio. No entanto, seus estudos lhe custaram caro. Morreu aos 66 anos de idade, de leucemia, provavelmente causada pela exposição excessiva aos elementos radioativos. Pierre Curie morreu bem mais cedo, aos 46 anos, em consequência de atropelamento por uma carruagem, antes mesmo de Marie receber o segundo prêmio Nobel. (PASSOS; SOUSA, 2010)

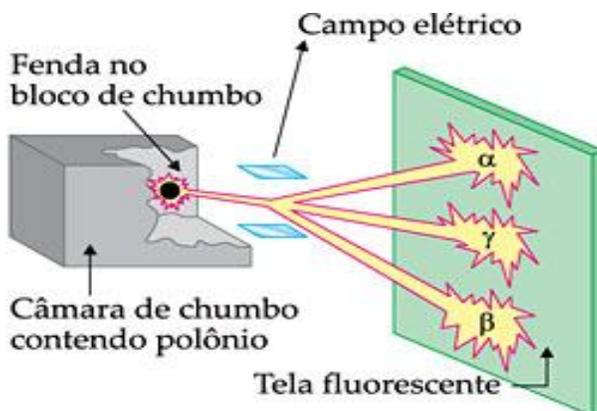
#### 1.4 A NATUREZA DAS RADIAÇÕES

Apesar da descoberta da radioatividade e até de novos elementos químicos radioativos, a complexidade dos fenômenos radioativos somente ficou conhecida com os estudos realizados por Ernest Rutherford, um jovem cientista neozelandês que desenvolveu sua tese de doutorado na Universidade de Cambridge, Inglaterra, e se transferiu para a Universidade de McGill, no Canadá, onde lecionou e iniciou os estudos para desvendar os raios de Becquerel. (OKUNO, 2007)

Rutherford realizou experimentos fundamentais para o entendimento dos fenômenos radioativos.

Em 1899, ao realizar uma de suas experiências, descobriu que as radiações eram de três naturezas diferentes. Rutherford submeteu a radiação proveniente do

elemento polônio a um campo elétrico e descobriu que sua trajetória era desviada de duas formas distintas. Denominou-as, radiação alfa, que possuía carga elétrica positiva e radiação beta, que possuía carga elétrica negativa. Havia ainda um terceiro tipo cuja trajetória não era modificada pelo campo. Portanto, não deveria ter carga elétrica. Rutherford nomeou-a radiação gama. (SAFFIOTI, 1982)



**Figura 2** – Dispositivo idealizado por Rutherford para estudar os diferentes tipos de radiações.

**Fonte:** Disponível em: <http://www.profpc.com.br/2002-21-133-09-i002.jpg>.

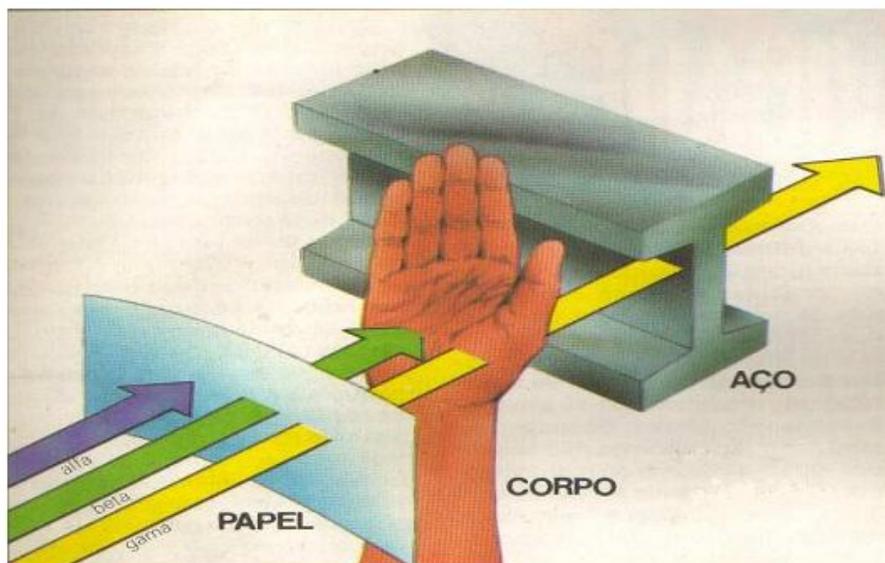
Estudos posteriores realizados por Rutherford lhe permitiram identificar as características de cada uma das três diferentes formas de radiação:

**Radiação alfa** – com duas cargas elétricas positivas fundamentais, foi identificada como átomos do gás hélio sem seus dois elétrons. Embora seja emitida com velocidades enormes, cerca de dois terços da velocidade da luz, ela penetra apenas alguns centímetros no ar.

**Radiação beta** – idênticos aos elétrons, com uma carga negativa fundamental, e massa cerca de 1/1850 da do átomo de hidrogênio.

**Radiação gama** – Os raios gama são radiações eletromagnéticas, que apresentam a mesma natureza dos raios X, mas são de menor comprimento de onda e, portanto mais energéticos. Devido à sua natureza ondulatória, e ausência de carga elétrica, a radiação gama é muito mais penetrante do que as partículas  $\alpha$  e  $\beta$ .

Os raios gama ultrapassam uma barra de aço, as partículas beta penetram no corpo humano e as partículas alfa são barradas por uma folha de papel. (GALETTI; LIMA, 2008)



**Figura 3** – Capacidade de penetração das partículas alfa, beta e gama.  
**Fonte:** GOLDEMBERG, 1994, p.45

A tabela abaixo especifica a constituição de cada uma das três formas de radiação:

**Tabela 1** – Propriedades da radiação alfa, beta e gama

Propriedade	Tipos de radiações		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Carga	2+	1-	0
Massa	$6,64 \times 10^{-24}$ g	$9,11 \times 10^{-28}$ g	0
Poder de penetração relativo	1	100	10.000
Natureza da radiação	Núcleo de ${}^4_2\text{He}$	Elétrons	Fótons de alta energia

**Fonte:** BROWN *et al.*, 2005, p.773

A importância da experiência realizada por Rutherford é que ela revelou que a estrutura dos átomos podia ser alterada. Rutherford levantou a hipótese de que os átomos emitiam radiação espontaneamente, em busca de maior estabilidade energética. Portanto, deveriam se transformar liberando algumas partículas juntamente com um excedente de energia. Trabalhando com Frederick Soddy em 1902-03, Rutherford identificou o fenômeno de meia vida de radiação e formulou a aceita explicação de radioatividade. “A radioatividade resulta da transmutação de

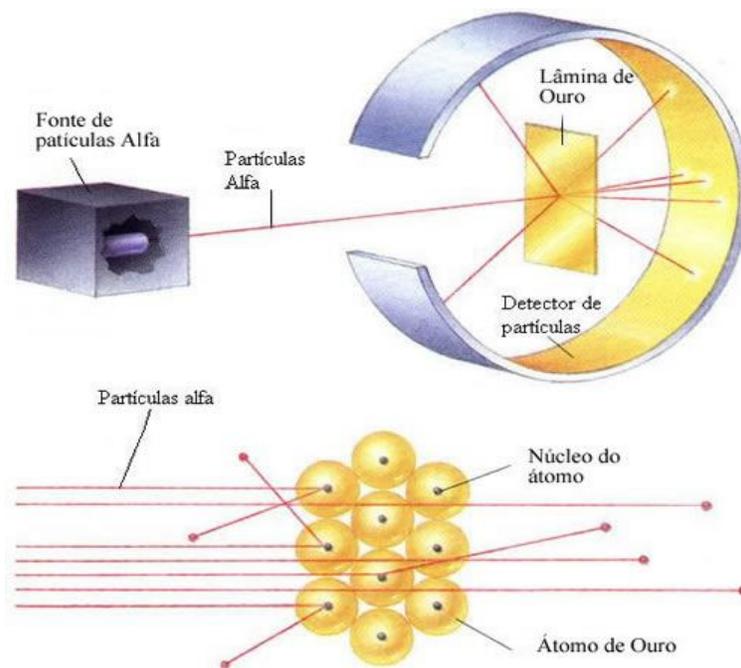
elementos químicos em outros elementos, com período individual de transformação para cada tipo de átomo”. Esta teoria estimulou muitos outros cientistas, incluindo ele mesmo, para ordenar todos os elementos radioativos em série de queda e procurar outros elementos que faltavam. Em 1908, Rutherford foi agraciado com o prêmio Nobel de Química pelas suas “investigações sobre a desintegração dos elementos e a Química das substâncias radioativas”. (OKUNO, 2007)

### 1.5 A DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO

Segundo Martins (1990) em 1907, antes mesmo de receber o prêmio Nobel, Ernest Rutherford tornou-se professor de Física da Universidade de Manchester, Inglaterra. Manchester já era naquela época um dos grandes celeiros científicos da Inglaterra. Ali Rutherford teve auxiliaries de peso: Hans Geiger, Henry Moseley, Charles Darwin, James Chadwick, Ernest Marsden, Niels Bohr, Nevill Mott e Thomas Royds. Foi com o auxílio de alguns desses grandes cientistas que Rutherford realizou o experimento que o consagrou como o pai da física nuclear, pois durante esse estudo, Rutherford descobriu a existência do núcleo atômico.

Convencido de que a partícula alfa poderia servir como sonda para mergulhar no interior do átomo, Rutherford inicia um programa de pesquisa que ficou conhecido como espalhamento de partículas alfa. (PASSOS; SOUSA, 2010)

Nesse experimento, um fluxo de partículas alfa ( $\alpha$ ) é emitido pelo elemento radioativo Polônio (Po) em lâminas de ouro. Rutherford observou que algumas partículas alfa atravessavam a lâmina em linha reta, mas outras se desviavam e se espalhavam, como é possível observar na próxima figura.



**Figura 4** – Experimento fundamental para descoberta do núcleo atômico.

**Fonte:** Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/images/rutherford01.jpeg>, tradução nossa.

Rutherford chegou à conclusão de que deveriam existir espaços nos átomos de ouro, por onde as partículas alfa atravessavam em linha reta. No entanto, as que eram desviadas, só poderiam ser desviadas por colidirem com um núcleo que segundo ele, deveria possuir carga positiva, pois estaria repelindo as partículas alfa. Em 1911, Rutherford publicou um artigo descrevendo que o átomo deveria ser composto por um pequeno núcleo carregado positivamente e rodeado por uma grande eletrosfera (uma região envolta do núcleo que contém elétrons). Esse modelo ficou conhecido como modelo atômico de Rutherford e foi o que mais se aproximou do modelo utilizado atualmente. (PASSOS; SOUSA, 2010)

Os resultados obtidos nessa experiência permitiram que todos os processos que envolvem o núcleo atômico, tal como a radioatividade, pudessem ser estudados de forma mais abrangente.

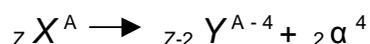
## 1.6 DECAIMENTO RADIOATIVO ESPONTÂNEO

De acordo com Cardoso (2003) segundo a teoria estabelecida por Rutherford e Soddy, um núcleo com excesso de energia tende a estabilizar-se, emitindo partículas alfa ou beta. Em cada emissão de uma dessas partículas, há uma

variação do número de prótons no núcleo, isto é, o elemento se transforma ou se transmuta em outro, de comportamento químico diferente. Essa transmutação também é conhecida como desintegração radioativa, designação não muito adequada, porque dá a idéia de desagregação total do átomo e não apenas da perda de sua integridade. Um termo mais apropriado é decaimento radioativo, que sugere a diminuição gradual de massa e atividade.

Confirmadas as hipóteses enunciadas por Ernest Rutherford e Frederick Soddy, o próprio Soddy e Kasimir Fajans enunciaram as leis que levam seus nomes e que determinam os produtos finais de uma decomposição radioativa, ou decaimento radioativo. Soddy refere-se ao primeiro elemento como sendo o elemento pai e o segundo, elemento filho. Se após o primeiro decaimento, o elemento filho ainda não tiver alcançado a estabilidade energética, ele também decairá e assim por diante, até se transformar em um elemento estável. (OKUNO, 2007)

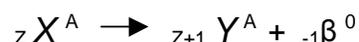
**Lei de Soddy** – quando um nuclídeo (isótopo de um elemento radioativo) emite uma partícula alfa, ele se transforma num elemento, cujo átomo possui seu número atômico com duas unidades a menos que o nuclídeo pai, e seu número de massa possui quatro unidades a menos que o nuclídeo pai.



Soddy ainda teve a colaboração de outros dois cientistas ao descobrir que um átomo quando emite uma partícula beta, “avança uma unidade” na classificação periódica e o seu número de massa permanece constante.

Esta observação resultou na segunda lei da radioatividade.

**Lei de Soddy, Fajans e Russel** – quando um nuclídeo emite uma partícula beta, seu número atômico aumenta uma unidade e seu número de massa permanece constante. (PASSOS; SOUSA, 2010)





Segundo Passos e Sousa (2010) com a descoberta da estrutura nuclear do átomo, as leis da radioatividade tornaram-se evidentes. Um exemplo de como as leis puderam ser explicadas é a constituição da partícula alfa, que possui dois prótons e dois nêutrons no núcleo. Portanto, sua emissão conseqüentemente ocasionará a diminuição no número de massa do átomo em quatro unidades.

A instabilidade nuclear, espontânea ou induzida, pela emissão de radioatividade, deve reduzir a massa do material radioativo, que se transforma progressivamente em outra substância, denominada isótopo (termo criado por Frederick Soddy em 1913 para designar as diferentes espécies do mesmo elemento). No entanto, na natureza nem sempre encontramos todos os radioisótopos (isótopos dos elementos radioativos), alguns deles precisam ser sintetizados em laboratório. A explicação para determinada situação é que diferentes núcleos sofrem decaimento radioativo com diferentes velocidades. Muitos radioisótopos decaem basicamente de maneira completa em questão de segundos ou menos, o que explica o fato de não serem encontrados na natureza, ao passo que outros, como o urânio-238, por exemplo, decaem muito lentamente, por isso, apesar de sua instabilidade, ainda podemos observá-lo na natureza. Essa característica particular de um radioisótopo é denominada cinética de decaimento. (BROWN *et al.*, 2005)

### 1.7 MEIA-VIDA DE UM RADIOISÓTOPO

Segundo Cardoso (2003) cada elemento radioativo, seja natural ou obtido artificialmente, se transmuta (se desintegra ou decai) a uma velocidade que lhe é característica. Para se acompanhar a duração (ou a “vida”) de um elemento radioativo foi preciso estabelecer uma forma de comparação. Essa forma de comparação conduz a definição do conceito de meia vida dos elementos. Chama-se meia-vida o intervalo de tempo no qual metade dos núcleos atômicos de uma amostra radioativa se desintegra. Meia-vida, portanto, é o tempo necessário para a atividade de um elemento radioativo ser reduzida à metade da atividade inicial.

Quanto menor for a meia-vida de um isótopo, maior será sua atividade e portanto maior será o número de partículas radioativas emitidas pela amostra na unidade de tempo. Por exemplo: o estrôncio-90 é um emissor de partículas beta (beta emissor) de meia-vida de cerca de 20 anos. Isto significa que, decorridos 20 anos, metade de sua massa se desintegrou. O isótopo  $^{238}_{92}\text{U}$  do urânio tem meia-vida longa: 5 bilhões de anos, que é, aproximadamente, a idade do globo terrestre. (SAFFIOTI, 1982, p.21-22)

O mesmo autor ainda destaca que a meia-vida de um elemento químico pode servir como um relógio nuclear, artifício com o qual se consegue determinar as idades de diferentes objetos.

A tabela abaixo nos mostra as meia-vidas e tipo de decaimento radioativo para vários radioisótopos, naturais e sintéticos:

**Tabela 2** – As meia-vidas e tipo de decaimento para vários radioisótopos

	Isótopo	Meia-vida	Tipo de decaimento
Radioisótopos naturais	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \times 10^9$	Alfa
	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,0 \times 10^8$	Alfa
	$^{232}_{92}\text{Th}$	$1,4 \times 10^{10}$	Alfa
	$^{40}_{19}\text{K}$	$1,3 \times 10^9$	Beta
	$^{14}_6\text{C}$	5.715	Beta
Radioisótopos sintéticos	$^{239}_{94}\text{Pu}$	24.000	Alfa
	$^{137}_{55}\text{Cs}$	30	Beta
	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28,8	Beta
	$^{131}_{53}\text{I}$	0,022	Beta

Fonte: BROWN *et al.*, 2005, p.780

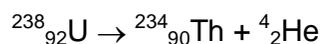
Com o auxílio da tabela, fica evidente a necessidade de sintetizar em laboratório alguns radioisótopos, pois o tempo de meia-vida de determinados elementos é muito baixo, o que impossibilita encontrá-los na natureza.

## 2 REAÇÕES NUCLEARES

Murray (2004) descreve as reações nucleares como sendo processos em que ocorre alguma alteração no caráter de um núcleo, seja de forma espontânea, ou como resultado de bombardeio por partículas, neste caso o processo ocorre artificialmente.

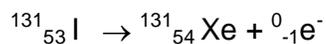
### 2.1 EQUAÇÕES DE DECAIMENTO RADIOATIVO

Um núcleo de urânio-238, por exemplo, é radioativo e sofre reação nuclear na qual os núcleos de Hélio-4 são emitidos espontaneamente. Essas partículas são denominadas partículas alfa, e um feixe delas leva o nome de radiação alfa. Ao perder uma partícula alfa, o fragmento restante do urânio-238, agora possui número atômico 90 e número de massa 234. É, portanto um núcleo de tório-234. Essa reação é representada pela seguinte equação nuclear:

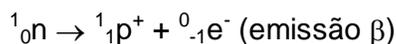


Como neste decaimento a partícula envolvida é a partícula alfa, descrevemos esse processo como decaimento alfa. (BROWN *et al.*, 2005)

Outro exemplo de equação nuclear ocorre no decaimento por emissão beta. Como a radiação beta é formada por elétrons, sua representação nas equações nucleares é feita pelo símbolo  ${}_{-1}^0\beta$ . O índice inferior -1 representa a carga negativa da partícula, contrária à do próton. Na parte superior, o zero é usado para indicar que a massa do elétron é insignificante em relação à massa de um núcleon (núcleons são os componentes básicos dos núcleos atômicos.). Um exemplo de decaimento por emissão beta ocorre com o iodo-131:



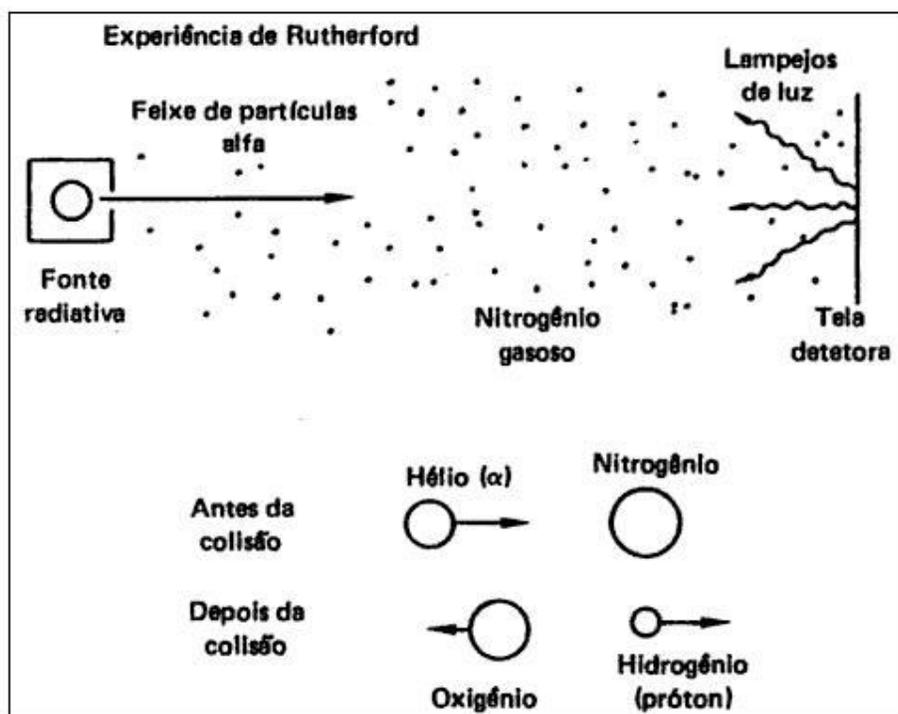
A emissão beta equivale à conversão do nêutron ( ${}^1_0\text{n}$ ) em um próton ( ${}^1_1\text{p}$  ou  ${}^1_1\text{H}$ ), em conseqüência, ocorre o aumento do número atômico em 1.



Numa equação nuclear, a soma dos números de massa deve ser a mesma em ambos os lados da equação, assim como a soma dos números atômicos. (BROWN *et al.*, 2005)

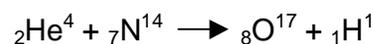
## 2.2 TRANSMUTAÇÃO NUCLEAR

Segundo Murray (2004) Rutherford ainda é o autor de mais um episódio importante do ponto de vista da transmutação dos elementos. O primeiro exemplo de conversão artificial de um elemento químico em outro, o processo de transmutação, foi descoberto por ele, no ano de 1919. Rutherford bombardeou com partículas alfa (núcleos de hélio), proveniente de uma fonte radioativa, um isótopo de nitrogênio. Os resultados foram a obtenção de um isótopo de oxigênio e um próton.



**Figura 5** - Transmutação por reação nuclear.  
Fonte: MURRAY, 2004, p.32

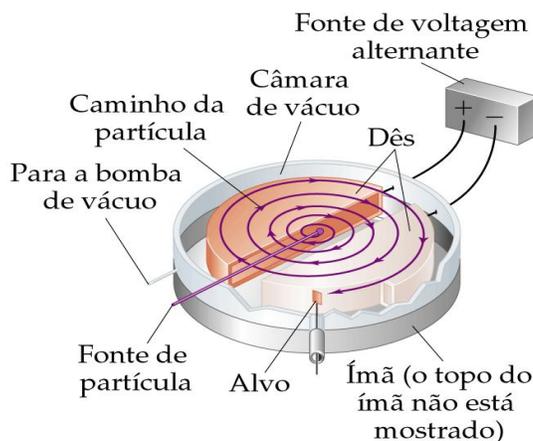
A equação do processo é:



Essa equação demonstra que as reações nucleares podem ser induzidas quando se choca um núcleo com partículas tais como as partículas alfa, o que possibilita a síntese de centenas de radioisótopos em laboratório. (MURRAY, 2004)

O mesmo autor descreve que é difícil para a partícula alfa entrar no núcleo de um determinado elemento por causa da repulsão eletrostática dos dois núcleos positivamente carregados que interagem. No entanto, isso se torna possível com os aceleradores de partículas.

De acordo com Brown *et al.* (2005) o mais eficaz de todos os aceleradores de partículas - o ciclotron - foi inventado e construído por volta de 1930 por Ernest Lawrence, um físico norte-americano de grande dinamismo que recebeu o prêmio Nobel de Física em 1939 por sua invenção.



**Figura 6** – Desenho esquemático de um ciclotron. Um ciclotron consiste de eletrodos em forma de D (dês) com um grande ímã circular acima e abaixo da câmara. As partículas carregadas são aceleradas ao redor de um anel, aplicando-se voltagem alternadamente aos dêses. Quando as partículas estão movendo-se a uma velocidade suficiente, elas não podem escapar do ciclotron e atingem o alvo.

**Fonte:** BROWN *et al.*, 2005, p.778

O mesmo autor descreve que os aceleradores de partículas serviram, em particular, para fabricar elementos radioativos artificiais e são até hoje utilizados para investigar a estrutura fundamental da matéria. Os estudos realizados hoje, são feitos em aceleradores de proporções gigantescas, como as do Laboratório Acelerador LHC (sigla em inglês de Large Hadron Collider - Grande Colisor de Hádrons), o maior e mais complexo instrumento científico já construído que está localizado nos Alpes suíços. A circunferência que abriga o LHC possui 27 km de diâmetro.



**Figura 7**– Vista aérea do Laboratório Acelerador LHC, na Suíça. O aparelho, cujo custo é estimado em US\$8 bilhões, foi projetado para atirar partículas de prótons umas contra as outras quase à velocidade da luz.

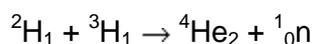
**Fonte:** Disponível em:

[http://www.oarquivo.com.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=265:acelerador-de-particulas-lhc-large-hadron-collider-e-ativado-parte-1&catid=42:ciencia-e-tecnologia&Itemid=126](http://www.oarquivo.com.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=265:acelerador-de-particulas-lhc-large-hadron-collider-e-ativado-parte-1&catid=42:ciencia-e-tecnologia&Itemid=126)

## 2.3 FUSÃO NUCLEAR

“É uma reação de núcleos pequenos produzindo núcleos maiores com liberação colossal de energia. É o princípio de funcionamento das estrelas e das bombas termonucleares (Bomba H)”. (PASSOS; SOUSA, 2010, p. 139)

Brown *et al.* (2005) descreve que o domínio do processo de fusão nuclear tem sido o sonho dos cientistas, pois do ponto de vista energético nenhuma outra reação é tão poderosa. Nesse processo, quantidades imensas de energia são liberadas. No entanto, a reação de fusão para obtenção de energia é muito complexa, pois exige temperaturas elevadíssimas, próximas às temperaturas do interior do sol, necessárias para aproximar os núcleos com energia suficiente para superar as repulsões nucleares. Em tais temperaturas, a matéria não existe em forma de átomos ou moléculas, e sim na forma de um plasma formado por núcleos e elétrons não ligados. Essas condições são encontradas no sol, onde ocorre a reação de fusão de núcleos de hidrogênio na formação do núcleo de hélio, conforme a reação:



Esta reação libera cerca de 26,7 MeV de energia que chega até a terra em forma de luz e calor.

Essa forma de geração de energia atrai os cientistas, pois existe na terra uma grande disponibilidade de isótopos mais leves e porque os produtos da fusão em geral não são radioativos. Independentemente desse fato, a fusão não é usada na geração de energia. A temperatura mais baixa necessária para que o processo de fusão ocorra é 40.000.000 K. Nessas condições de temperatura, nenhum material estrutural conhecido é capaz de resistir, e esse por si só, já é um grande problema a ser superado. Temperaturas muito altas têm sido atingidas com a utilização de uma bomba atômica para iniciar o processo de fusão, como ocorre na bomba termonuclear ou bomba de hidrogênio. Porém, do ponto de vista de geração controlada de energia, essa abordagem é inaceitável. (BROWN *et al.*, 2005)

Segundo Passos e Sousa (2010) o sol é um gigantesco reator termonuclear, se os seres humanos conseguissem de alguma forma reproduzir o que acontece lá, outras formas de geração e obtenção de energia “suja” poderiam deixar de ser utilizadas.



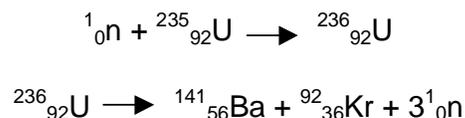
**Figura 8** – Sol, um reator de fusão natural.

**Fonte:** Disponível em: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/fissao-e-fusao-nuclear/fusa.php>

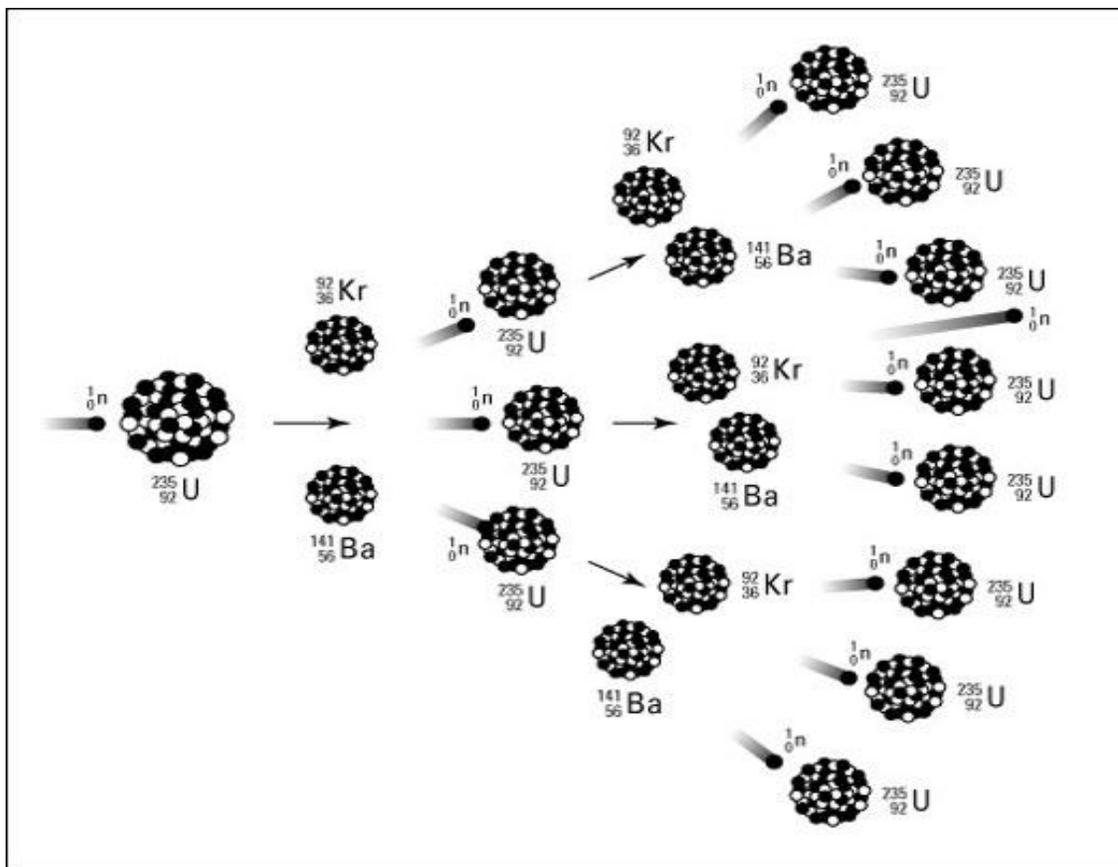
## 2.4 FISSÃO NUCLEAR

Segundo Passos e Sousa (2010) a descoberta da fissão nuclear constituiu um dos eventos de maior importância do século XX. Aconteceu em 1938, quando dois cientistas (Otto Hahn e Fritz Strassman) isolaram e identificaram o bário em uma amostra de urânio, que havia sido bombardeada com nêutrons. Ao se perguntarem sobre como o bário poderia ter sido formado, chegaram à conclusão de que o urânio havia sido dividido em duas partes menores, no processo que hoje chamamos de

fissão nuclear. Foi determinado que o urânio 235, primeiramente capturava um nêutron para formar o urânio 236. A partir daí, o isótopo sofre a fissão nuclear, produzindo dois novos núcleos, o bário, com número de massa 141 e o criptônio, com número de massa 92. A equação do processo é:



A reação de fissão produz mais nêutrons do que o necessário para iniciar o processo. Se uma fissão produz dois nêutrons, esses nêutrons podem então ser aproveitados para provocar mais duas fissões, liberando mais quatro nêutrons que poderão produzir quatro fissões, e assim por diante, o que nos leva ao conceito da chamada reação em cadeia. (PASSOS; SOUSA, 2010)



**Figura 9** – Fissão Nuclear: a captura de um nêutron por urânio 235 produz urânio 236. Este isótopo sofre fissão, formando diversos fragmentos, juntamente com diversos nêutrons. Esses nêutrons iniciam outras reações nucleares ao serem absorvidos por outros núcleos de urânio. O processo é altamente exotérmico, produzindo aproximadamente  $2 \times 10^{10}$  kJ/mol.

Fonte: PASSOS; SOUSA, 2010, p.125

Dentre as muitas reações nucleares, a fissão é a que apresenta o maior significado prático. É possível produzir mais de 200 isótopos diferentes de 35 elementos distintos entre os produtos da fissão de urânio – 235. Muitos deles, radioativos. Para que a fissão nuclear possa ocorrer, é necessário que a amostra do material físsil tenha certa massa mínima, para que os nêutrons não escapem da amostra antes de atingir outros núcleos. Essa quantidade mínima de amostra ou material físsil, necessária para manter a reação em cadeia é denominada massa subcrítica. No caso do urânio, a massa subcrítica é de 1 kg. Uma massa superior a massa subcrítica é denominada massa supercrítica. (BROWN *et al.*, 2005)

Segundo o mesmo autor é essa concepção de massa subcrítica ou supercrítica que irá determinar se o uso da fissão nuclear será destinado para fins bélicos (armamento nuclear) ou para fins pacíficos (geração de energia e usos medicinais), as três grandes aplicações práticas do processo de fissão.

### 3 ARMAMENTO NUCLEAR

Segundo Gross (1946) as notícias da descoberta do processo de fissão nuclear se espalharam rapidamente na comunidade científica e a possibilidade de se utilizar a fissão na construção de explosivos, tornou-se uma preocupação.

O mesmo autor descreve que em plena Segunda Guerra Mundial, quase todos os países envolvidos intensificaram os trabalhos sobre a utilização da energia atômica, em especial a Alemanha. Institutos inteiros trabalhavam a portas fechadas, no mais absoluto sigilo. Os nomes de alguns dos mais conhecidos especialistas desapareceram por completo dos periódicos científicos, o que gerou grande desconfiança por parte dos outros cientistas.

Todos esses acontecimentos levaram o físico mais famoso da época, em 1939, Albert Einstein, a escrever uma carta ao então presidente americano Roosevelt, explicando as implicações das descobertas. Einstein alertava sobre o fato de a Alemanha ter suspenso a venda de urânio de suas minas, relacionando-o com a possibilidade da construção de uma bomba extremamente poderosa pelos nazistas, a bomba atômica. Automaticamente, o presidente Roosevelt determinou que os Estados Unidos investigassem e viabilizassem a construção de uma bomba com base na reação de fissão, dando início a um grande projeto que culminou no desenvolvimento da primeira bomba atômica. (PASSOS; SOUSA, 2010)

#### 3.1 A BOMBA ATÔMICA

Segundo Murray (2004) apesar do esforço da Alemanha, o desenvolvimento da primeira bomba atômica ocorreu nos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial. O projeto teve início em 1941 sob a direção do físico Julius Robert Oppenheimer e envolveu o trabalho de vários cientistas americanos e europeus, dentre eles os físicos Niels Bohr, Enrico Fermi e Richard Feynman. Albert Einstein não participou diretamente no projeto, que ficou conhecido como Projeto Manhattan. O custo para realização do projeto foi de aproximadamente 2 bilhões de dólares aos cofres americanos, um valor quase inconcebível naquela época. O primeiro teste foi feito com sucesso em 16 de julho de 1945, em Alamogordo, Novo México. Em seguida, a bomba atômica foi usada pela primeira vez contra o Japão, em Hiroshima e Nagasaki, no dia 6 de agosto de 1945.

Ao dar início a execução do projeto, os cientistas se depararam com vários obstáculos. O primeiro deles era quantificar o urânio em níveis pré determinados. O urânio necessário para gerar uma reação em cadeia deveria ser suficiente o bastante para que conseguisse desencadear a reação de tal forma, capaz de gerar uma explosão nuclear. Para isso, precisariam enriquecer o urânio natural. (MURRAY, 2004)

### 3.2 ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO

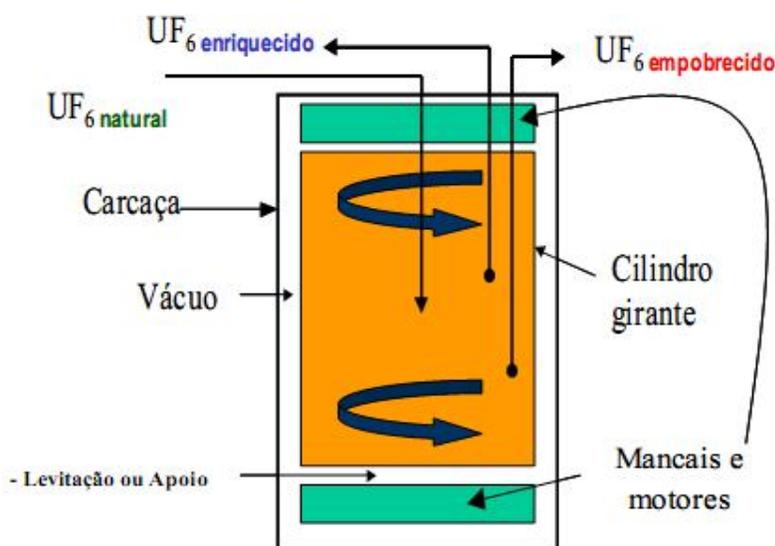
Gross (1946) descreve que o urânio natural existente na terra é constituído de dois isótopos, de pesos atômicos 235 e 238, com uma diferença de peso de pouco mais de 1%, pois o núcleo do isótopo mais leve possui 3 nêutrons a menos do que o isótopo mais pesado. Somente o isótopo (urânio 235) está sujeito ao processo de fissão como reação em cadeia. No entanto o  $^{235}\text{U}$  representa somente 0,7% em peso do urânio natural. Isso explica a razão pela qual o urânio natural é inofensivo, pois grande parte dos seus nêutrons é captada pelos núcleos do isótopo mais pesado, impedindo que uma explosão de forma espontânea ocorra na natureza. Portanto, para que o processo de fissão do urânio ocorra em grande escala, é necessário enriquecê-lo do seu isótopo mais leve. Esse enriquecimento deve ocorrer de tal forma a se obter  $^{235}\text{U}$  suficiente para sustentar a reação em cadeia. É a partir do enriquecimento do urânio natural que se poderá obter a massa subcrítica, necessária para a construção da bomba atômica.

Existem maneiras diferentes de se realizar o processo de enriquecimento do urânio. Atualmente o método mais conhecido é a ultracentrifugação. (SILVA; MARQUES, 2006)

### 3.3 CENTRÍFUGAS

De acordo com Silva e Marques (2006) as centrífugas constituem a parte principal do processo de enriquecimento do urânio. O urânio 235 é um pouco mais leve que o urânio 238, e é baseado nessa diferença de peso que o processo de ultracentrifugação é realizado. O primeiro passo na realização desta etapa é reagir o urânio com ácido fluorídrico, formando o hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ). O gás é então enviado as centrífugas, onde ocorrerá a separação pela força centrífuga, agindo nas

partículas de  $\text{UF}_6$ , concentrando-se o  $^{238}\text{U}$  em uma região mais externa do que o  $^{235}\text{U}$ , tendo em vista que o primeiro é mais pesado somente cerca de 1% em relação ao segundo. Daí o nome “ultra” centrifugação (operar em velocidades tangenciais muito altas), para separar dois elementos cujas massas são muito próximas.



**Figura 10** – Esquema de Ultracentrífuga. Dentro da centrífuga, o isótopo de urânio 235 tende a concentrar-se mais no centro, e o 238 fica mais próximo à parede do cilindro. Duas tubulações de saída recolhem o urânio, sendo que numa delas segue o urânio que tiver maior concentração de isótopos 235 e na outra, o que tiver mais 238.

**Fonte:** Disponível em: [http://ecen.com/eee54/eee54p/eee54p\\_cores\\_web.pdf](http://ecen.com/eee54/eee54p/eee54p_cores_web.pdf)

Embora seja apenas uma pequena diferença de concentrações, ao extrair o gás do centro da centrífuga, o mesmo possuirá mais  $^{235}\text{U}$  do que antes. Esse gás é o  $\text{UF}_6$  enriquecido. O gás retirado próximo à parede da centrífuga é denominado  $\text{UF}_6$  empobrecido (com menor teor de  $^{235}\text{U}$ ). O procedimento de ultracentrifugação é repetido várias vezes em centrífugas subseqüentes, em efeito cascata, até que se obtenha a concentração desejada de  $^{235}\text{U}$ . As centrífugas de urânio giram a uma velocidade de aproximadamente 100.000 rpm. Os materiais utilizados na sua construção possuem altíssima resistência e a montagem requer muita precisão. O sistema foi desenvolvido na Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial. Atualmente, menos de dez países dominam essa tecnologia, sendo o Brasil um deles. O urânio enriquecido neste processo pode ser usado tanto em usinas nucleares quanto na fabricação da bomba atômica. (SILVA; MARQUES, 2006)

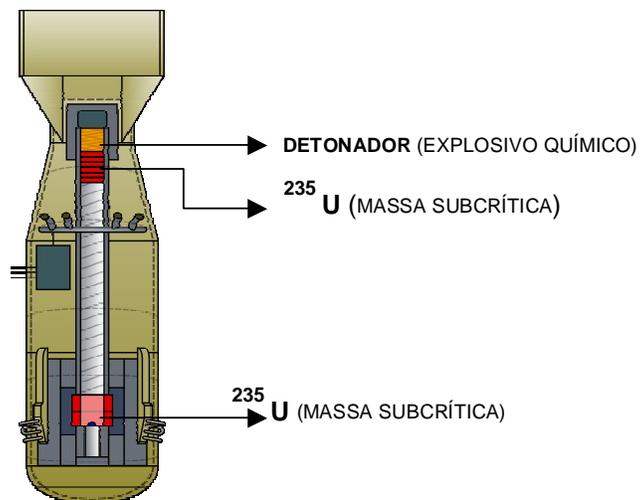
### 3.4 FUNCIONAMENTO DA BOMBA

De acordo com Oldenberg e Holladay (1971) o funcionamento da bomba atômica é considerado um processo “bastante simples”, tendo em vista que o maior esforço empregado na sua fabricação é o enriquecimento do urânio natural.

A bomba de urânio consiste de certa quantidade do isótopo “fissionável”  $^{235}\text{U}$ , no qual a fissão de um átomo causa a fissão de mais átomos pela reação em cadeia descrita, até que a massa toda seja consumida pela fissão ou dispersada pela explosão. (OLDEMBERG; HOLLADAY, 1971, p.316)

Para que não haja absorção de nêutrons por impurezas, o urânio usado na bomba deve ser purificado, permitindo que todos os nêutrons liberados sejam aproveitados na reação em cadeia. A montagem da bomba é feita de tal forma que várias massas subcríticas de urânio possam ser depositadas em um mesmo compartimento, sem que haja o contato direto entre as partes. Dentro do compartimento também é colocado um explosivo químico, usado para disparar a reação de fissão. A bomba é detonada, reunido as diversas massas subcríticas de  $^{235}\text{U}$ , formando uma massa supercrítica, que leva a uma reação em cadeia rápida e sem controle, e no final, a uma explosão nuclear. A união das massas subcríticas deve ocorrer de forma rápida, se forem reunidas gradualmente, parte do urânio se perde, pois a explosão começaria antes que a massa supercrítica fosse totalmente formada. (OLDEMBERG; HOLLADAY, 1971)

Na figura a seguir, é possível observar o diagrama esquemático da primeira bomba atômica usada na guerra, lançada em Hiroshima e Nagasaki, em 1945.



**Figura 11** – Projeto usado em bombas atômicas. Um explosivo convencional é usado para colocar duas massas subcríticas juntas para formar uma massa supercrítica.

**Fonte:** Disponível em:  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Little\\_Boy\\_internal\\_diagram\\_\(no\\_labels\).svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Little_Boy_internal_diagram_(no_labels).svg)

“A energia liberada pela bomba jogada em Hiroshima, era equivalente à energia liberada por 20 mil toneladas de TNT (ela, conseqüentemente, é chamada de uma bomba de 20 quilotons)”. Infelizmente, por ser um projeto “simples”, a construção de uma bomba atômica com base na fissão está ao alcance de qualquer país que tenha um reator nuclear, devido à disponibilidade de materiais físseis. Esse fato vem ocasionando a proliferação das armas nucleares. (BROWN *et al.*, 2005, p.791)

## 4 USINAS NUCLEARES

Segundo Passos e Sousa (2010) a primeira aplicação prática do processo de fissão foi para fins de guerra, mas sem dúvida, a principal finalidade desse processo, na qual se obtém o maior sucesso atualmente, é a utilização na produção de energia elétrica. Os cientistas, após a Segunda Guerra Mundial, já previam a aplicação da fissão de forma controlada na obtenção de energia, e iniciaram os estudos para viabilizar essa possibilidade. As previsões foram concretizadas e o desenvolvimento das usinas nucleares foi um marco na história. O princípio da fissão nuclear passou a servir como meio de obtenção de energia para fins pacíficos, com a finalidade de suprir as necessidades de diversos países, até então dependentes de outras formas de geração de energia.

### 4.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

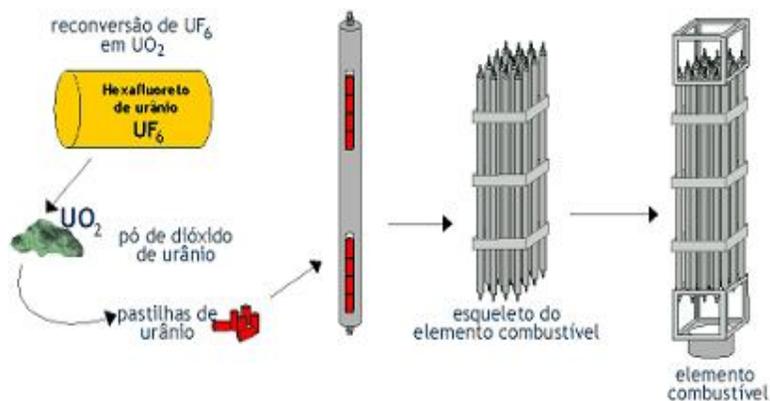
As usinas nucleares se baseiam no processo de fissão para gerar calor. Esse processo ocorre dentro de um reator nuclear, que é um dispositivo que permite iniciar e controlar reações nucleares auto-sustentadas, com grandes quantidades de material especialmente preparado, gerando grandes quantidades de energia. (GALETTI; LIMA, 2008)

A partir daí, o funcionamento é bem parecido com o de uma usina termelétrica. Em ambas as instâncias, o calor é usado para produzir vapor, que posteriormente irá mover as turbinas conectadas a um gerador elétrico. (BROWN *et al.*, 2005)

### 4.2 COMBUSTÍVEL

Segundo Cardoso (2003) o urânio-235 e o plutônio-239 são os isótopos físséis comuns usados como combustíveis nos reatores para produção de energia. O  $^{235}\text{U}$  é obtido no processo de enriquecimento do urânio natural, já o  $^{239}\text{Pu}$ , deve ser produzido por uma reação nuclear, tendo em vista que o mesmo é encontrado na natureza em quantidades mínimas (cerca de 1%). Essa reação ocorre adicionando um nêutron ao  $^{238}\text{U}$ , formando o  $^{239}\text{U}$ , que ao sofrer duas emissões beta, formará o plutônio-239. O plutônio se forma dentro do próprio reator nuclear,

como subproduto do processo de fissão do urânio e pode então ser retirado e usado como material físsil. Normalmente o urânio é enriquecido a aproximadamente 3% de  $^{235}\text{U}$ , para depois ser usado na forma de grânulos ou pastilhas de  $\text{UO}_2$  (dióxido de urânio). Essas pastilhas são revestidas em tubos de zircônio ou aço inoxidável, para serem utilizadas no reator. Esses tubos são denominados varetas de combustível.



**Figura 12** – Varetas de combustível. As varetas, contendo o urânio, são montadas numa estrutura denominada elemento combustível.

Fonte: CARDOSO, 2003, p.17

As varetas de combustível são lacradas, com o objetivo de não deixar escapar o urânio e outros fragmentos resultantes da fissão. São capazes de suportar altas temperaturas e constituem a primeira barreira para impedir a saída de materiais radioativos para o meio ambiente. (CARDOSO, 2003)

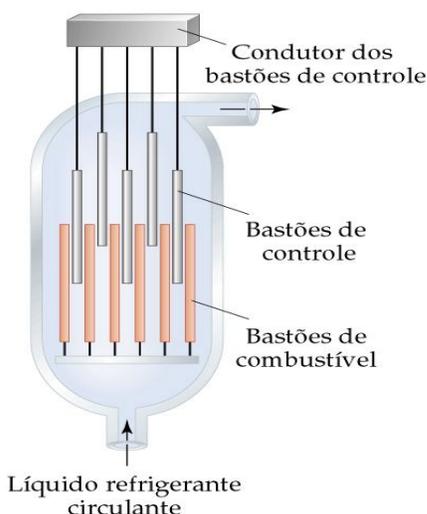
#### 4.3 CONTROLE DA REAÇÃO DE FISSÃO

Segundo Brown *et al.* (2005) num reator nuclear, a fissão ocorre com uma velocidade relativamente baixa, cuidadosamente controlada. O controle da reação de fissão é feito pelos absorvedores de nêutrons (têm a propriedade de absorver nêutrons, porque seus núcleos podem conter ainda um número de nêutrons superior ao existente em seu estado natural).

A reação de fissão, só ocorre se estiverem disponíveis nêutrons o suficiente para sustentar a reação em cadeia. A retirada de nêutrons do processo permite controlar a reação ou até mesmo paralisá-la. Os absorvedores de nêutrons são bastões, compostos de materiais não fissionáveis, como o cádmio ou boro. Esses bastões

são inseridos dentro do núcleo do reator, local onde ocorre o processo de fissão, regulando o fluxo de nêutrons para manter a reação em cadeia auto-sustentável, enquanto previnem que o reator esquente. (BROWN *et al.*, 2005)

O mesmo autor descreve que o núcleo do reator possui também, um moderador de nêutrons, que serve para diminuir a velocidade dos nêutrons, permitindo que eles possam ser capturados mais facilmente pelo combustível. Um líquido refrigerante circula pelo núcleo do reator, com a finalidade de retirar o calor gerado pela fissão nuclear.



**Figura 13** – Núcleo do reator. É possível observar os elementos combustíveis, os bastões de controle e o líquido refrigerante.

Fonte: BROWN *et al.*, 2005, p.792

O núcleo do reator, não corre o risco de explodir com a violência de uma bomba atômica. Primeiro, porque dentro dele não é possível atingir os níveis supercríticos, necessários para gerar uma explosão nuclear, tendo em vista que a concentração de urânio-235 é muito baixa (cerca de 3,2%). Segundo, porque dentro do reator nuclear existem materiais absorvedores de nêutrons, que controlam e até acabam com a reação em cadeia, como, por exemplo, na parada do reator. No entanto, o superaquecimento do reator, pode gerar um grande estrago, devido à liberação de materiais radioativos para o ambiente. (BROWN *et al.*, 2005)

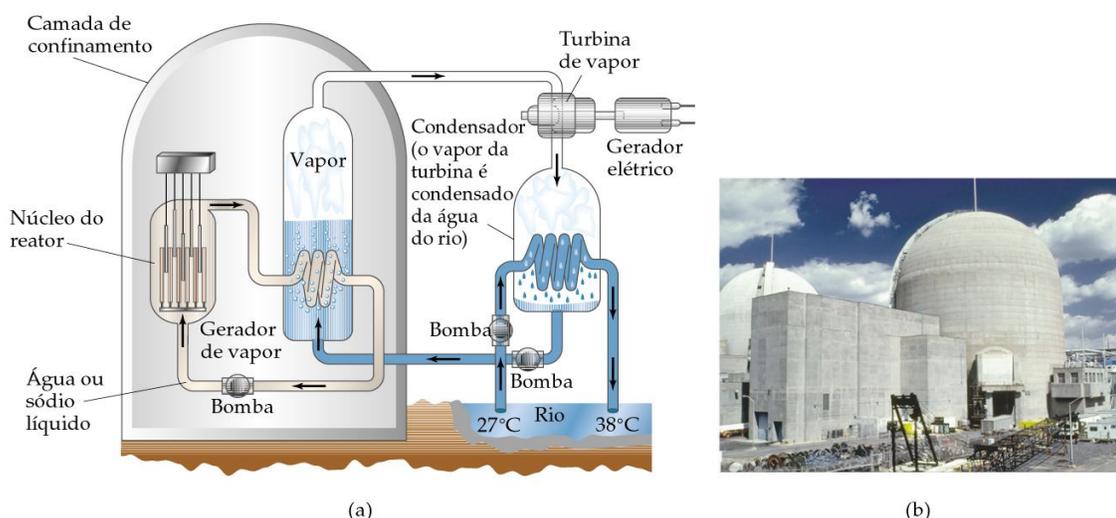
#### 4.4 A SEGURANÇA DOS REATORES NUCLEARES

De acordo com Cardoso (2003) o fato de um reator nuclear não poder explodir como uma bomba atômica, não quer dizer que não seja possível ocorrer um acidente em uma central nuclear. Para prevenir esse acontecimento, a construção de uma usina nuclear envolve vários aspectos de segurança, desde a fase de projeto até a construção civil, montagem dos equipamentos e operação. A planta de uma usina nuclear prevê uma série de contenções, visando impedir o vazamento de materiais radioativos para o meio ambiente.

Segundo o mesmo autor existem pelo menos quatro barreiras físicas, criadas para conter um possível vazamento de materiais radioativos. São elas:

A Vareta de Combustível, o Vaso de Pressão do Reator, a Contenção ou camada de confinamento e o edifício do reator.

O desenho de uma usina nuclear e seu funcionamento são exemplificados na figura abaixo.



**Figura 14** – (a) Projeto básico de uma usina de energia nuclear. O calor produzido pelo núcleo do reator é carregado por um líquido refrigerante, como água ou sódio líquido, para um gerador de vapor. O vapor, então, produzido é usado para mover um gerador elétrico. (b) Uma usina de energia nuclear em Salem, Nova Jersey. É possível observar a camada de retenção de concreto em forma de domo.

**Fonte:** BROWN *et al.*, 2005, p.792

A camada de confinamento e o edifício do reator (camada de concreto) são os principais sistemas de segurança. A primeira é feita de aço e no caso do reator de angra 1, no Brasil, tem uma espessura de 3,1 cm. O edifício do reator em angra 1, possui 1 metro de espessura e além impedir a saída de material radioativo para o

meio ambiente, protege contra impactos externos (queda de aviões e explosões). (CARDOSO, 2003)

#### 4.5 PRÓS E CONTRAS

De acordo com Goldemberg (1998) a geração de energia elétrica pelas usinas nucleares enfrenta grandes pressões mundiais contrárias à sua utilização. No entanto, essa forma de produção de energia elétrica é freqüentemente citada como possível solução para o problema da utilização de outros recursos como as termelétricas e as hidrelétricas, causadoras de grandes impactos ambientais.

O mesmo autor descreve alguns problemas relativos à implementação das usinas nucleares. Segundo ele, o custo na montagem dessas usinas é muito elevado, muitos países que adotam essa tecnologia dependem dos países industrializados para fornecer a matéria prima, pois não possuem a tecnologia necessária para enriquecer o urânio natural. A segurança do reator também é um problema. Existem inúmeros sistemas de prevenção e as ocorrências de acidentes são muito pequenas, porém, quando ocorrem, geram conseqüências extremamente graves, devido à emissão de radiação. Existe ainda a questão dos resíduos radioativos que constitui hoje o maior desafio desse tipo de tecnologia. Milhares de toneladas de resíduos radioativos são armazenados todo ano em depósitos próximos dos reatores, devido ao alto índice de radiação.

Brown *et al.* (2005) destaca que existe um considerável número de pesquisas relacionadas à destinação final segura de dejetos radioativos. Estuda-se um meio de imobilizá-los, como a formação de vidro, cerâmica ou rochas sintéticas a partir desses dejetos. Os materiais seriam então armazenados em recipientes de alta resistência à corrosão e durabilidade, para depois serem enterrados bem fundo. É preciso ainda garantir que os sólidos e seus recipientes não quebrarão com o calor gerado pelo decaimento nuclear, permitindo que a radioatividade atinja os mananciais hídricos.

Segundo Murray (2004) mesmo com todos esses problemas a serem solucionados, a razão de as usinas nucleares serem atualmente utilizadas por muitos países deve-se ao fato de haver uma escassez de recursos para obtenção de energia elétrica e também porque essas usinas oferecem uma alternativa aos recursos atualmente disponíveis.

Murray (2004) descreve que apesar do custo da instalação da usina nuclear ser alto, o custo do combustível é baixo, especialmente em comparação ao petróleo. As usinas nucleares dispõem de uma reserva energética muito maior em relação às usinas termelétricas e hidrelétricas, além de gerar um impacto ambiental muito menor, pois as termelétricas são altamente poluentes e as hidrelétricas devastam grandes áreas úteis à agricultura, devido aos alagamentos.

Para Reis e Silveira (2000), a energia nuclear, apesar de não ser renovável, poderá um dia se constituir, se todos os problemas levantados forem solucionados, numa das principais alternativas futuras de geração de energia elétrica, principalmente por não gerar emissões diretas de material poluente.

## 5 USOS MEDICINAIS

Segundo Okuno (2007) a utilização de elementos radioativos para fins medicinais tem sido extremamente importante para salvar a vida de milhões de pessoas no mundo inteiro. Os tratamentos médicos feitos com radioisótopos têm dado a essas pessoas uma nova esperança de vida. É possível diagnosticar doenças, para que posteriormente possam ser tratadas e curadas e para que os pacientes possam ter, além de maior longevidade, maior qualidade de vida.

“Na medicina, as aplicações da radiação são feitas em um campo genericamente denominado Radiologia, que por sua vez compreende a radioterapia, a radiologia diagnóstica e a medicina nuclear”. (OKUNO, 2007, p.62)

### 5.1 RADIOTERAPIA PARA CÂNCER

Constitui uma das principais formas de tratamento do câncer na atualidade. Os cânceres são caracterizados pelo crescimento desordenado de células anormais, produzindo massas de tecido, denominados tumores malignos. Essas células, que se reproduzem rapidamente, são mais susceptíveis à destruição pela radiação. O principal objetivo da radioterapia é a eliminação de tumores cancerígenos, através da aplicação de radiação proveniente de um radioisótopo. O princípio básico é eliminar as células cancerígenas (doentes), evitando a sua proliferação no organismo. Com a eliminação dessas células, ocorre a substituição das mesmas por células saudáveis. (CARDOSO, 2003)

O mesmo autor explica que o tratamento é feito com aplicações programadas de doses elevadas de radiação, com a finalidade de “matar” as células alvo e causar o menor dano possível aos outros tecidos, considerados saudáveis. Um dos elementos mais usados na radioterapia é o cobalto-60. O césio 137 também já foi muito utilizado, mas aos poucos foi substituído, pois a energia da radiação gama emitida pelo césio é relativamente baixa. Como as doses aplicadas são muito altas, os pacientes sofrem danos orgânicos significativos, pois outros tecidos são afetados, e ficam muito debilitados. Por isso devem ser cuidadosamente acompanhados por terapeutas, psicólogos, apoio quimioterápico e de medicação.

A radioterapia tem a capacidade de destruir o tumor cancerígeno, porém nem sempre é possível eliminá-lo. Em todo o caso, o tratamento quando não cura,

melhora a qualidade de vida do paciente durante o tempo de vida que lhe resta. (CARDOSO, 2003)

## 5.2 RADIOLOGIA DIAGNÓSTICA

Consiste na obtenção de imagens do interior do corpo em uma chapa fotográfica ou até mesmo em uma tela de TV, através da utilização de um feixe de raios X. Permite examinar as estruturas anatômicas do paciente e determinar a existência de qualquer anormalidade. Algumas tecnologias possibilitam a visualização de tumores em determinados órgãos, onde dificilmente seria identificado pela radiografia convencional, pois a mesma, muitas vezes não permite distinguir tecidos normais e anormais, que apresentam pequena diferença de absorção de raios X. (CARDOSO, 2003)

A tomografia computadorizada é um exemplo da grande evolução na área da radiologia diagnóstica, foi desenvolvida a partir de 1972 e constitui um importantíssimo método para identificar qualquer alteração prejudicial ao corpo humano. Esse sistema produz imagens detalhadas, possibilitando a visualização de fatias do corpo, sem a superposição de órgãos. “É como se a gente fizesse, por exemplo, um corte transversal em uma parte do corpo em pé e o visse de cima”. (OKUNO, 2007, p.64)

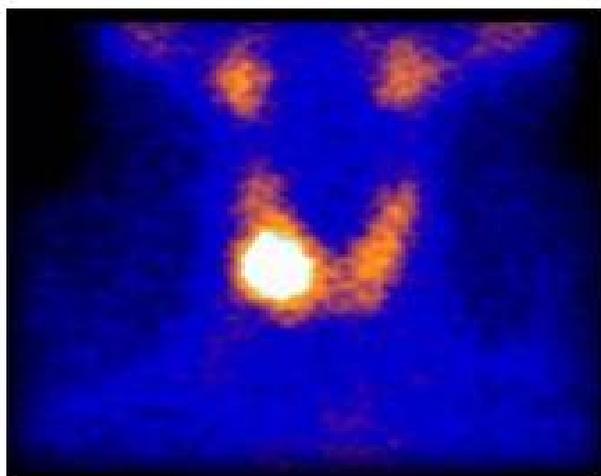
Essas imagens são projetadas em uma tela de computador, onde posteriormente serão analisadas pela equipe médica.

## 5.3 MAPEAMENTO DE ÓRGÃOS COM RADIOISÓTOPOS

De acordo com Okuno (2007) os radioisótopos também podem ser utilizados com o propósito de diagnóstico, fornecendo as mais diversas informações sobre o tipo ou extensão da doença. Diferencia-se do diagnóstico feito com raios X, pelo tipo de informação obtida. No caso dos raios X, a informação está mais relacionada com a anatomia, enquanto que no uso de radionuclídeos é possível obter informações sobre o metabolismo e fisiologia dos órgãos.

Segundo Cardoso (2003) o mapeamento consiste em injetar substâncias radioativas na veia do paciente. Estas substâncias serão absorvidas por determinados órgãos e depois de certo tempo, com o uso de um equipamento que

mede a radioatividade da substância injetada, é possível mapear o órgão responsável pela absorção. Um dos exemplos mais conhecidos é o mapeamento da tireóide, onde são usados o iodo-131 e o iodo-123 na forma de iodeto de sódio. Esse elemento é absorvido no organismo, preferencialmente pela glândula tireóide, onde se concentra. O funcionamento dessa glândula depende de como ocorre a absorção do iodo pela mesma. Portanto, ao passar pelo detector é possível observar em um mapa, as características de absorção do iodo pela glândula.



**Figura 15** – Mapeamento da tireóide. A área mais brilhante indica uma maior concentração do radioisótopo.

**Fonte:** CARDOSO, 2003, p. 39

A partir dessas imagens, um diagnóstico, no caso um radiodiagnóstico, é feito por comparação com um mapa padrão de uma tireóide normal. A mesma técnica é utilizada no mapeamento de fígado e pulmão. (CARDOSO, 2003)

O uso de radioisótopos para diagnosticar doenças, requer muitos cuidados e uma série de exigências devem ser cumpridas, a principal delas é o tempo de meia-vida do elemento. O tempo de meia-vida deve ser curto, pois após o mapeamento, o elemento deve cessar a sua atividade, antes de causar efeitos adversos. Um radioisótopo bastante utilizado nos dias atuais e que cumpre grande parte das exigências, é o tecnécio-99 metastável (o isótopo pode perder alguma energia e se tornar estável). O tempo de meia vida desse elemento é de 6 horas. O tecnécio-99 metastável é largamente usado no mapeamento dos pulmões, para a análise da medula óssea, fígado e baço. (MURRAY, 2004)

## 6 CONCLUSÃO

A descoberta da radioatividade se constituiu num dos eventos de maior importância na história da ciência. Tal consideração se deve a grande contribuição dos estudos realizados a respeito desse fenômeno, feitos por cientistas renomados como Becquerel, Marie e Pierre Curie, Rutherford e outros grandes pesquisadores que promoveram o progresso da ciência, a partir da sua busca incessante pelo conhecimento. É evidente a importância desses estudos nas mais diversas áreas do conhecimento humano, principalmente na Química, com a descoberta de novos elementos e com descobertas que foram fundamentais para o desenvolvimento da teoria atômica.

Na Medicina, a área que mais utiliza a radiação atualmente, milhões de pessoas tiveram uma melhora na qualidade de vida e outras tantas puderam ser salvas graças às propriedades dos elementos radioativos e sua aplicação no diagnóstico e tratamento de doenças.

Os estudos também mostraram que a geração de energia elétrica através das reações nucleares poderia ser viável e com o passar dos anos, essa previsão se concretizou. Essa forma de geração de energia, desde que solucionados os problemas abordados, poderá se consolidar como uma das principais alternativas à substituição dos combustíveis fósseis, um recurso não renovável e muito poluente.

No entanto, as mesmas pesquisas que trouxeram tantos benefícios, também serviram para o oposto. Muitas pessoas perderam a vida ou ainda sofrem as consequências dos ataques nucleares realizados em Hiroshima e Nagasaki. O desenvolvimento da bomba atômica, infelizmente é mais um exemplo de como as descobertas científicas nem sempre são utilizadas para fins pacíficos. Enquanto pessoas se dedicam a aplicar os conhecimentos científicos no desenvolvimento de tecnologias para melhorar a qualidade de vida, outras vêm no conhecimento uma forma de dominação, por meio de artefatos de guerra e de destruição, baseando-se em interesses individuais. Por isso, é importante destacar que a ciência continuará a fazer as suas descobertas que podem ser utilizadas tanto para o bem, quanto para o mal.

Cabe à sociedade se organizar para decidir a melhor forma de aplicação das novas tecnologias, garantindo que as gerações futuras possam usufruir dos benefícios provenientes dessas novas descobertas.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. V. de. **A radioatividade e suas aplicações**. São Carlos, SP: USP, 2004. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/monografia-radioatividade-aplicacoes-pdf-pdf-a1520.html>>. Acesso em: 20 set. 2010.

BROWN, T. L *et al.* **Química: a ciência central**. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

CARDOSO, E. de M. **Apostila Educativa da CNEN**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br>>. Acesso em: 12 out. 2010.

GALETTI, D; LIMA, C. L. **Energia nuclear: com fissões e com fusões**. São Paulo: UNESP, 2008.

GOLDEMBERG, J. **Energia nuclear**. São Paulo: Scipione, 1994.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Edusp, 1998.

GROSS, B. **A bomba atômica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Kosmos, 1946.

INSTITUTO DE FÍSICA, [200-?]. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/images/rutherford01.jpeg>>. Acesso em: 05 out. 2010.

MARTINS, R. A. Como becquerel não descobriu a radioatividade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v.7, n especial, p. 27-45, jun.1990. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/10061/9286>>. Acesso em: 02 out. 2010.

MURRAY, R. L. **Energia nuclear: uma introdução aos conceitos, sistemas e aplicações dos processos nucleares**. São Paulo: Hemus, 2004.

O ARQUIVO, [200-?]. Disponível em : <[http://www.oarquivo.com.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=265:acelerador-de-particulas-lhc-large-hadron-collider-e-ativado-parte-1&catid=42:ciencia-e-tecnologia&Itemid=126](http://www.oarquivo.com.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=265:acelerador-de-particulas-lhc-large-hadron-collider-e-ativado-parte-1&catid=42:ciencia-e-tecnologia&Itemid=126)>. Acesso em: 12 out. 2010.

OKUNO, E. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios**. São Paulo: Harbra, 2007.

OLDENBERG, O; HOLLADAY, W. G. **Introdução à física atômica e nuclear**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1971.

PASSOS, M. H. S; SOUSA, A. A de. **Química nuclear e radioatividade**. Campinas, SP: Átomo, 2010.

PORTAL de Estudos em Química, 2010. Disponível em:  
<<http://www.profpc.com.br/2002-21-133-09-i002.jpg>>. Acesso em 29 set. 2010.

PORTAL São Francisco, 1998. Disponível em:  
<<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/fissao-e-fusao-nuclear/fissao-e-fusao-nuclear.php>>. Acesso em: 18 out. 2010.

REIS, L.B. SILVEIRA, S. (Orgs.) **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável: introdução de uma visão multidisciplinar**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

SAFFIOTI, W. **Fundamentos da Radioatividade**. São Paulo: Vozes, 1982.

SILVA, O. L. P da; MARQUES, A. L. F. Enriquecimento de urânio no Brasil: Desenvolvimento da tecnologia por ultracentrifugação. **Economia e energia**, Rio de Janeiro, n. 54, p. 03-09, fev-mar. 2006. Disponível em:  
<[http://ecen.com/eee54/eee54p/eee54p\\_cores\\_web.pdf](http://ecen.com/eee54/eee54p/eee54p_cores_web.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2010.

STRATHERN, P. **Curie e a radioatividade em 90 minutos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2000.

WIKIMÉDIA commons, 2009. Disponível em:<[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Little\\_Boy\\_internal\\_diagram\\_\(no\\_labels\).svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Little_Boy_internal_diagram_(no_labels).svg)>. Acesso em: 05 nov. 2010.