

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE QUÍMICA**

VINICIUS DE SOUZA BARBOSA MAIA

URÂNIO DEPLETADO



VANTAGENS E DESVANTAGENS DE UMA APLICAÇÃO TECNOLÓGICA

RIO DE JANEIRO

2017

VINICIUS DE SOUZA BARBOSA MAIA

**URÂNIO DEPLETADO – VANTAGENS E DESVANTAGENS
DE UMA APLICAÇÃO TECNOLÓGICA**

**Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de bacharel em Química
com Atribuições Tecnológicas.**

Orientador: Júlio Carlos Afonso

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais que sempre pensaram na educação como parte fundamental da minha formação pessoal, que sempre me apoiaram nas minhas escolhas e me incentivaram para que eu chegasse até aqui; dedico também a todas as professoras e professores aos quais tive a sorte de ser aluno e que influenciaram de alguma forma no meu crescimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todos os meus familiares que se animavam quando eu dizia que estudava química, em especial aos meus pais e minha irmã; à minha namorada por todo apoio, carinho e chocolates; ao Professor Júlio, que logo na primeira conversa já se empolgou com minhas ideias e mostrou os possíveis caminhos que eu poderia seguir para realizar este trabalho; e a todas as amigas que construí nas salas e corredores do Instituto de Química e que com certeza levarei por toda minha vida.

RESUMO

PROJETO DE CURSO

TÍTULO: URÂNIO DEPLETADO: VANTAGENS E DESVANTAGENS DE UMA APLICAÇÃO TECNOLÓGICA

ALUNO: Vinicius de Souza Barbosa Maia

ORIENTADOR: Júlio Carlos Afonso. DQA – Instituto de Química – UFRJ

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo baseado em cobertura jornalística, resenha histórica e artigos científicos sobre o elemento químico urânio desde o seu descobrimento no século XVIII até a atualidade, com foco principal no urânio depletado, gerado após o enriquecimento do urânio natural em seu isótopo de massa 235. São apresentadas algumas aplicações do urânio e a descoberta de uma propriedade que revolucionou o mundo da ciência, a radioatividade. Passando por esse contexto, não poderiam ser deixados de lado alguns acontecimentos que marcaram a história mundial e foram influenciados diretamente pelo urânio e pela radioatividade, tanto para o bem quanto para o mal, como a descoberta de novos elementos químicos e a aplicação da radioatividade no diagnóstico e tratamento de doenças. O emprego do urânio e do plutônio para a construção das bombas atômicas que devastaram as cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão, não só marcou o fim da Segunda Guerra Mundial, mas inseriu a energia atômica sob o signo do medo. O uso civil e militar do urânio depletado também é abordado, devido a características peculiares como elevada densidade. Ele é empregado na blindagem de tanques e na produção de munições perfurantes, que foram utilizadas em alguns conflitos no Golfo Pérsico e na região da ex-República Socialista Federativa da Iugoslávia, o que levantou muitos questionamentos sobre os possíveis malefícios causados pelo urânio na população civil e nos militares que estiveram presentes naquelas regiões.

SUMÁRIO

1	Introdução	9
1.1	A descoberta de um novo elemento químico	9
1.2	Abundância no Universo e na Terra	11
1.3	Os isótopos naturais	12
1.4	Ocorrências minerais destacando o Brasil.....	14
1.5	Usos do urânio antes da descoberta da radioatividade	15
2	A descoberta da radioatividade e novos elementos químicos	17
2.1	Os primeiros indícios da radioatividade	17
2.2	O grande passo da radioatividade	19
2.3	A descoberta de novos elementos e a consolidação da radioatividade.....	22
3	A fissão nuclear e o Projeto Manhattan: a origem do urânio depletado.....	28
3.1	A descoberta que colocou o urânio na liderança da energia nuclear.....	28
3.2	Os esforços para isolar o urânio-235 e o Projeto Manhattan.....	31
4	O urânio depletado	38
4.1	Propriedades radioativas do urânio depletado.....	38
4.2	Grandes estoques mundiais	39
4.3	Usos alternativos para o urânio depletado.....	40
4.4	Aplicações militares	42
4.5	Emprego comprovado em guerras.....	45
4.5.1	Guerras no Golfo Pérsico	46
4.5.2	Guerra civil na Iugoslávia.....	47
4.6	Efeitos sobre o ser humano e o ambiente.....	48
4.7	Possibilidades para diminuir o impacto causado pelo urânio depletado	50
5	Considerações finais.....	51
6	Referências	53
	ANEXO A – O urânio no Brasil nos últimos anos.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contracapa do terceiro volume do livro publicado por Klaproth	10
Figura 2. Série do Urânio. Decaimento radioativo do isótopo ^{238}U	13
Figura 3. Série do Actínio. Decaimento radioativo do isótopo ^{235}U	14
Figura 4. Lustre fabricado com vidro de urânio exposto à luz UV	16
Figura 5. Radiografia da mão da esposa de Wilhelm Conrad Röntgen	19
Figura 6. Marie Curie, Pierre Curie e o técnico de laboratório	27
Figura 7. Reação em cadeia do urânio-235	30
Figura 8. Algumas localidades onde o Projeto Manhattan foi desenvolvido	34
Figura 9. Outdoor nas proximidades de Oak Ridge	34
Figura 10. Nuvem de fumaça lançada após a explosão da bomba atômica	36
Figura 11. Esquema de ultracentrifugação	37
Figura 12. Fotografia aérea do local do acidente com o voo EI Al-1862	41
Figura 13. Modelo 3D de uma munição de urânio empobrecido	43
Figura 14. Composição de uma munição traçante de urânio depletado	44
Figura 15. Tanque iraquiano perfurado por projéteis de urânio depletado	44
Figura 16. Criança pendurada no cano de um tanque em Sarajevo	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Concentrações de urânio em matrizes ambientais.	11
Tabela 2. Características dos isótopos de urânio no urânio natural.	12
Tabela 3. Ocorrência mineral de urânio nas jazidas brasileiras.	15
Tabela 4. Comparação da atividade radioativa do urânio.	38
Tabela 5. Estimativa do estoque de UD em alguns países no ano 2008.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C. - antes de Cristo.

CP - Chicago Pile – *Pilha Chicago*

EI AI – Do hebraico: על אל – *aos céus*. Oficialmente: Linhas Aéreas Israelenses.

EUA - Estados Unidos da América.

INB - Indústrias Nucleares Brasileiras.

OTAN - Organização do Tratado do Atlântico Norte.

TNT - Trinitrotolueno.

UD - Urânio depletado.

UV - Ultravioleta.

1 Introdução

Os temas abordados nesta introdução serão a descoberta do urânio, a abundância do urânio no Universo e na Terra, os isótopos encontrados na natureza, as ocorrências minerais com foco principal nas minas e jazidas que se encontram no Brasil, e os usos do urânio antes da descoberta da radioatividade.

1.1 A descoberta de um novo elemento químico

A história do urânio começa com Martin Heinrich Klaproth, nascido no dia primeiro de dezembro de 1743, na cidade de Wernigerode, no estado da Saxônia-Anhalt, Alemanha. Durante a infância de Martin, a família Klaproth sofreu uma tragédia causada por um incêndio, o que dificultou o investimento da família na educação de Martin e seus dois irmãos. Os estudos de Martin foram, então, bancados por uma igreja porque ele fazia parte do coral da mesma. Aos 16 anos, Martin se tornou aprendiz em uma farmácia e após cinco anos como aprendiz, ele trabalhou por quatro anos nos laboratórios públicos de Quedlimburgo e Hanôver. No período da Páscoa de 1768 ele se tornou assistente no laboratório Wendland, em Berlim.

Em 1770 ele se tornou assistente do químico Valentin Rose (1736-1771), quem veio a falecer apenas alguns meses depois; assim, Klaproth não só assumiu a responsabilidade no laboratório que era de Rose, mas também deu assistência para sua família. Tempos depois Klaproth comprou o laboratório Fleming, casou-se com Sophie Christiana Lekman e tiveram quatro filhos.

Em 1789, enquanto Klaproth analisava amostras do mineral pechblenda (U_3O_8), proveniente de regiões onde hoje se encontra a República Tcheca, e que era pensado ser composto por ferro e zinco, ele dissolveu uma amostra do mineral em ácido nítrico e em seguida neutralizou a solução com potassa (hidróxido de potássio), obtendo um precipitado amarelo (diuranato de potássio, $K_2U_2O_7$), o qual foi dissolvido em excesso de potassa. Klaproth concluiu então que o mineral continha um novo elemento e a este ele deu o nome de urânio, em homenagem ao novo planeta Urano, recentemente descoberto por William Herschel (1738-1822).

Klaproth tentou então obter a forma metálica do novo elemento descoberto. Para isso ele realizou o mesmo procedimento que Peter Jacob Hjelm (1746-1813)

havia realizado para isolar o molibdênio, através de forte aquecimento de uma pasta contendo óleo com o precipitado amarelo. Ele obteve um pó preto e pensou ter isolado o urânio em sua forma metálica, mas na verdade, tratava-se do dióxido (UO_2).

O urânio metálico obtido por Klaproth foi aceito pelos químicos por mais de cinquenta anos, mas em 1841, quando Eugène-Melchior Péligot (1811-1890) analisava a reação de tetracloreto de urânio (UCl_4) com água, ele percebeu que o urânio não era reduzido pelo hidrogênio e o tetracloreto de urânio se transformava em dióxido de urânio (UO_2). Para resolver este problema ele aqueceu fortemente o cloreto de urânio anidro com potássio e obteve um pó preto com aspecto metálico e com propriedades um pouco diferentes daquelas encontradas na substância isolada por Klaproth¹.

Klaproth veio a falecer no dia primeiro de janeiro de 1817, mas deixou muitas contribuições para a química analítica e de minerais. Apesar de não ter conseguido isolar um novo elemento químico pela primeira vez, seu trabalho previu a descoberta do urânio e do zircônio. Ele reuniu seus documentos em um livro chamado *“Beiträge zur chemischen Kenntniss der Mineralkörper”* (Contribuições para o conhecimento químico de corpos minerais), do qual foram lançados seis volumes (Figura 1).

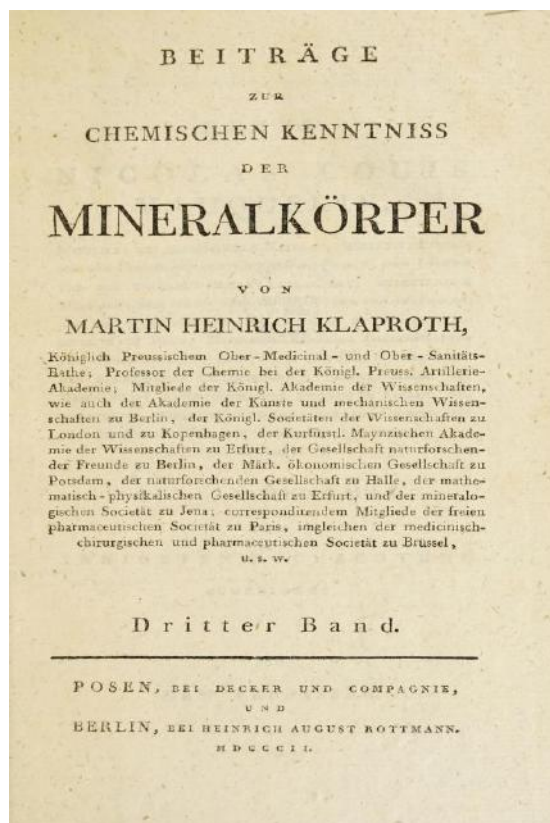


Figura 1. Contracapa do terceiro volume do livro publicado por Klaproth, em 1802.

1.2 Abundância no Universo e na Terra

Todo urânio presente no sistema solar teve origem a partir de uma ou mais supernovas. Uma supernova é um evento astronômico onde ocorre a explosão de uma estrela no qual a energia emitida é elevada por um fator 10 bilhões. Esta explosão ocorre no momento da queima final de uma estrela e é capaz de emitir um brilho muito intenso. O urânio pode ser encontrado em diversos tipos de meios, tanto em temperatura ambiente como em temperatura magmática, em diferentes fluídos com pressão e composição variadas².

A quantidade de urânio no Sol é extremamente pequena, com apenas 10^{-12} da abundância de hidrogênio, e nos meteoritos sua abundância é de 8 µg/kg. A abundância do urânio na Terra é próxima à do molibdênio e do arsênio e um pouco maior que o mercúrio, antimônio, tungstênio e cádmio. O urânio é o elemento de ocorrência natural que possui a maior massa molar; sua concentração na crosta terrestre é de cerca de 3 mg/kg (0,0003%); na água do mar, seu teor é de aproximadamente 3 µg/L.

A presença de urânio (Tabela 1) é observada no solo, em rochas, tanto na superfície como em águas profundas, no ar, nas plantas e nos animais. Também são encontradas quantidades-traço em alimentos e na água potável. O consumo diário de urânio é estimado em 1~2 µg proveniente de alimentos e 1,5 µg de água ingerida. Aproximadamente 56 µg de urânio estão presentes no corpo humano, 56% (32 µg) dessa quantidade estão no esqueleto, 11 µg no tecido muscular, 9 µg nas gorduras, 2 µg no sangue e menos que 1 µg no pulmão, fígado e rins. A maior parte do urânio encontrado no corpo humano provém de alimentos, especialmente de vegetais, cereais e sal de mesa³.

Tabela 1. Concentrações de urânio em matrizes ambientais.

Fonte: BLEISE, 2003³.

Matriz	Concentração aproximada
Solo	0,3~11,7 mg/kg
Ar	$2,5 \times 10^{-8} \sim 10^{-7}$ mg/m ³
Água (superfície)	$3 \times 10^{-2} \sim 2,1$ µg/L
Água (profundezas)	$3 \times 10^{-3} \sim 2,0$ µg/L

1.3 Os isótopos naturais

Na natureza são encontrados três isótopos do urânio: ^{234}U , ^{235}U e ^{238}U . Todos estes isótopos possuem as mesmas propriedades químicas, pois possuem o mesmo número de prótons (92), e todos também apresentam atividades radioativas, porém estas atividades são diferentes para cada isótopo (Tabela 2). A atividade radiológica depende do tempo de meia-vida, e dentre os três isótopos de ocorrência natural o ^{238}U apresenta o maior tempo de meia-vida, conseqüentemente é o mais abundante na natureza e possui a menor atividade radiológica. Por outro lado, o isótopo de menor abundância na natureza é o ^{234}U que também apresenta a maior atividade radioativa e o menor tempo de meia-vida. Devido a esse equilíbrio os isótopos ^{234}U e ^{238}U têm a mesma contribuição na radioatividade do urânio de ocorrência natural^{2,4}.

Tabela 2. Características dos isótopos de urânio no urânio de ocorrência natural.

Fonte: BLEISE, 2003³.

Isótopo	Meia-vida (anos)	Abundância relativa (%)	Atividade específica [Bq g ⁻¹]
^{234}U	$2,46 \times 10^5$	0,006	231×10^6
^{235}U	$7,04 \times 10^8$	0,72	80,011
^{238}U	$4,47 \times 10^9$	99,28	12,455

O urânio de ocorrência natural possui fraca atividade radiológica, mas é um metal tóxico do ponto de vista químico. Os isótopos do urânio sofrem decaimento radioativo dando origem a outros elementos radioativos, que por sua vez também sofrem decaimento, gerando uma reação em cadeia até que um elemento estável seja formado, cessando a transformação. Os isótopos ^{235}U e ^{238}U são responsáveis por duas cadeias de decaimento conhecidas como a série do actínio, originada a partir do ^{235}U , e a série do urânio, tendo como origem o ^{238}U . Durante as etapas da reação em cadeia são emitidas partículas alfa (α), beta (β) e radiação gama (γ). As partículas alfa possuem dois prótons e dois nêutrons, sendo assim, carregadas positivamente. Como consequência da sua massa e carga, a partícula alfa perde rapidamente sua energia cinética e possui uma baixa capacidade de penetração, chegando a aproximadamente 4 cm no ar e 50 μm em materiais de baixa rigidez. Devido a essas características a partícula alfa não é capaz de penetrar a pele

humana, mas esta radiação pode ser considerada um perigo interno para o corpo humano⁴.

A partícula beta e a radiação gama possuem um grande poder de penetração em relação à partícula alfa, sendo a radiação gama a que possui a maior capacidade de penetração, representando um grande perigo interno e externo ao corpo humano³.

O urânio encontrado na natureza está em equilíbrio com os elementos formados em sua cadeia de decaimento, chamados de *daughters* (do inglês, filhas), desta forma, o urânio natural apresenta de 4 a 5 vezes mais decaimentos por segundo em relação ao urânio puro. Na série radioativa do urânio ^{238}U (Figura 2), ocorre formação do gás nobre radioativo radônio (^{222}Rn), que escapa facilmente das rochas e do solo, sendo o maior contribuinte para a radiação a qual a população mundial é exposta. A cadeia de decaimento também é quebrada após a remoção do urânio de seu minério, e cerca de um ano após dessa separação somente o tório (^{234}Th) e protactínio (^{234}Pa) se encontram em equilíbrio com o urânio, sendo responsáveis por uma grande parte da radioatividade do urânio purificado. Os demais elementos da cadeia de decaimento que seguem o ^{234}U , têm tempo de meia vida de milhares de anos e demoram todo esse tempo para atingir o equilíbrio com o ^{238}U , e podem ser negligenciados. A série do actínio (Figura 3), originada pelo ^{235}U , possui o mesmo padrão, mas somente o tório (^{231}Th) entra em equilíbrio rapidamente com o ^{235}U purificado. Este é o isótopo do urânio empregado em armas nucleares e como combustível para geração de energia em usinas nucleares e, por esse motivo, o urânio natural, que possui aproximadamente 0,72% de ^{235}U , deve ser tratado para que a concentração deste isótopo seja elevada. Este tratamento é chamado de enriquecimento do urânio, e como um dos subprodutos é gerado o urânio depletado ou empobrecido (no isótopo de massa 235)⁴.

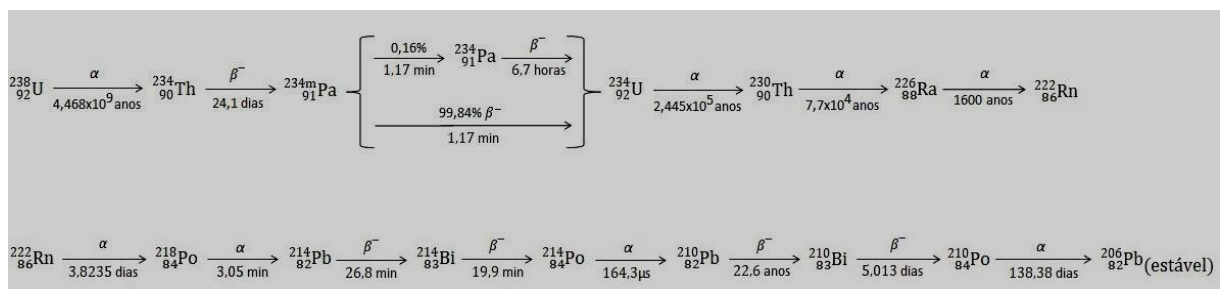


Figura 2. Série do Urânio. Decaimento radioativo do isótopo ^{238}U ⁴.

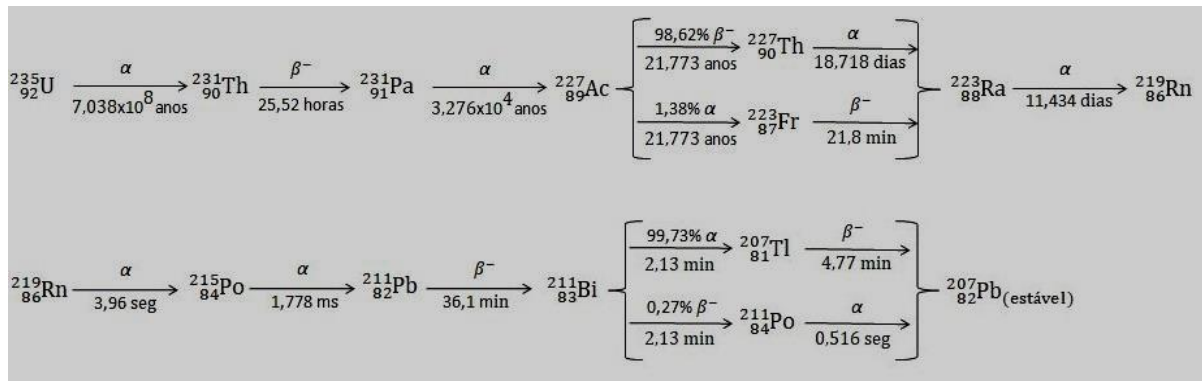


Figura 3. Série do Actínio. Decaimento radioativo do isótopo $^{235}\text{U}^4$.

1.4 Ocorrências minerais destacando o Brasil

A oxidação do urânio acontece facilmente em contato com o ar. Devido a essa característica a maior parte do urânio ocorre na natureza em forma de óxido. A substância mais comum encontrada nas minas de urânio é o óxido U_3O_8 , pois é a forma termodinamicamente mais estável dos óxidos de urânio, e contém cerca de 85% em massa do metal. A ocorrência do urânio se dá em aproximadamente 5% dos minerais conhecidos e alguns exemplos são o lignito, a monazita, em rochas e fertilizantes de fosfato⁴. Em minérios, a ocorrência do urânio se dá na uranita como óxido UO_2 , e na pechblenda como U_3O_8 ; também pode ocorrer em alguns minerais secundários como óxidos complexos, silicatos e vanadatos³.

O Brasil possui uma reserva de aproximadamente 309 mil toneladas de urânio, correspondendo à sexta maior reserva mundial hoje conhecida. Para esta estimativa são considerados tanto o urânio como o óxido de urânio. Essa reserva (Tabela 3) está dividida entre as jazidas de Itataia, no Ceará, Lagoa Real, na Bahia, Gandarela, em Minas Gerais, Rio Cristalino, no Pará, Figueira, no Paraná e outros depósitos menores. A jazida de Itataia possui urânio associado ao fosfato e é onde se encontra a maior parte da reserva nacional, com cerca 142 mil toneladas de urânio; já a jazida de Lagoa Real-Mina de Caetité possui aproximadamente 100 mil toneladas, quantidade que seria suficiente para suprir as usinas de Angra 1, Angra 2, Angra 3 e mais quatro usinas durante toda a vida útil das mesmas. As reservas brasileiras representam cerca de 6% das reservas mundiais de urânio⁵. Apesar de possuir uma grande reserva, o que dá ao Brasil a possibilidade de exportar urânio (Anexo A.1), somente as minas de Caetité, na Bahia, são exploradas; quando uma mina se esgota, é necessário que o país importe urânio (Anexo A.2).

Tabela 3. Ocorrência mineral de urânio nas jazidas brasileiras.Fonte: Relatório interno das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB) ⁶.

Jazida	Tipo de minério/mineralização
POÇOS DE CALDAS – MG	Associação urânio, molibdênio, zircônio, potássio. Rocha Hospedeira: Tinguaito e Rochas vulcânicas (alcalinas) – “Pipe em Brecha de Colapso/Rollfront”. Bem Mineral: urânio, molibdênio, zircônio e rocha potássica.
FIGUEIRA – PR (Bacia do Paraná)	Ocorrência carbonífera com urânio associado, em arenitos e rochas carbonosas (siltitos e carvões). Bem Mineral: urânio, molibdênio.
QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MG	Associação aurouranífera relacionada a metaconglomerados piritosos (seixos de quartzo). Bem Mineral: ouro, urânio e pirita.
AMORINÓPOLIS – GO (Borda da Bacia do Paraná)	Urânio associado a arenitos feldspáticos (subarcósios) – “Tipo Rollfront”. Bem Mineral: urânio (primário e secundário).
RIO CRISTALINO – PA	Quartzito feldspático e metarcósio são os principais hospedeiros da mineralização uranífera – Depósito tipo inconformidade proterozóica”. Bem Mineral: urânio.
ITATAIA – CE	Urânio associado a rocha fosfática (Colofanito) – “Depósito tipo fosfato”. Bem Mineral: fosfato e urânio.
LAGOA REAL – BA	Mineralização monometálica de urânio. Rocha hospedeira: Albitito metassomático (“tipo metassomatito granítico cálcio-sódico”). Bem Mineral: urânio
ESPINHARAS – PB	Urânio associado a gnaisses albitizados/albititos (rochas metassomatizadas). Bem Mineral: urânio.

1.5 Usos do urânio antes da descoberta da radioatividade

A aplicação do óxido de urânio natural para a fabricação de vidros e cerâmicas amareladas data de 79 a.C., muito tempo antes da descoberta do próprio elemento. Alguns artefatos de vidro desta época foram encontrados no ano de 1912 em uma vila próxima à cidade de Nápoles, na Itália, e o vidro amarelado continha aproximadamente 1% de óxido de urânio⁷. Algum tempo depois, durante a idade média, o mineral pechblenda era extraído de minas de prata na região da Bohemia, atual Republica Tcheca, e também era empregado como agente de colorização na indústria de vidros (Figura 4). O uso do urânio era bem pouco explorado antes da descoberta da radioatividade e até mesmo por algum tempo depois, além de ser empregado em pequenas quantidades para a fabricação de vidros amarelados e para a vitrificação de objetos produzidos com cerâmica. Ele também era aplicado na

fabricação de filamentos para lâmpadas de luz de palco, para melhorar a aparência de dentaduras, na indústria de couro e madeira como corante e para o tingimento de lã e seda. Alguns sais de urânio também foram empregados na fotografia para a produção de papeis fotográficos, os quais foram comercializados até pelo menos o final do século XIX, sendo substituídos, posteriormente, por halogenetos de prata, devido à sensibilidade superior destes⁸. No entanto, um toner fabricado pela Kodak entre as décadas de 1930 e 1950, comercializado pelo nome de Kodak T9, continha nitrato de urânio hexa-hidratado; até hoje alguns fotógrafos alternativos continuam utilizando processos baseados em urânio para a revelação de fotos⁷.

Após a descoberta da radioatividade e o isolamento do rádio a partir da pechblenda, realizado por Marie Curie, a produção de urânio para fins de extração do rádio se elevou enormemente. O rádio era utilizado para pintar os ponteiros do relógio e em tratamentos médicos e de embelezamento, dentre outros usos. O aumento do uso do rádio também aumentou significativamente a quantidade de urânio disponível, pois para a obtenção de 1 g de rádio, eram necessários cerca de 7 toneladas de pechblenda⁸. Com isso, os materiais de cerâmica que continham urânio em sua composição se tornaram abundantes e de custo acessível, sendo encontrados em diversas casas da época. Quando a radioatividade do urânio foi descoberta, ele passou a ser utilizado em práticas científicas, e devido ao elevado tempo de meia-vida do ^{238}U , ele passou a ser utilizado para estimar a idade das primeiras rochas ígneas⁷.

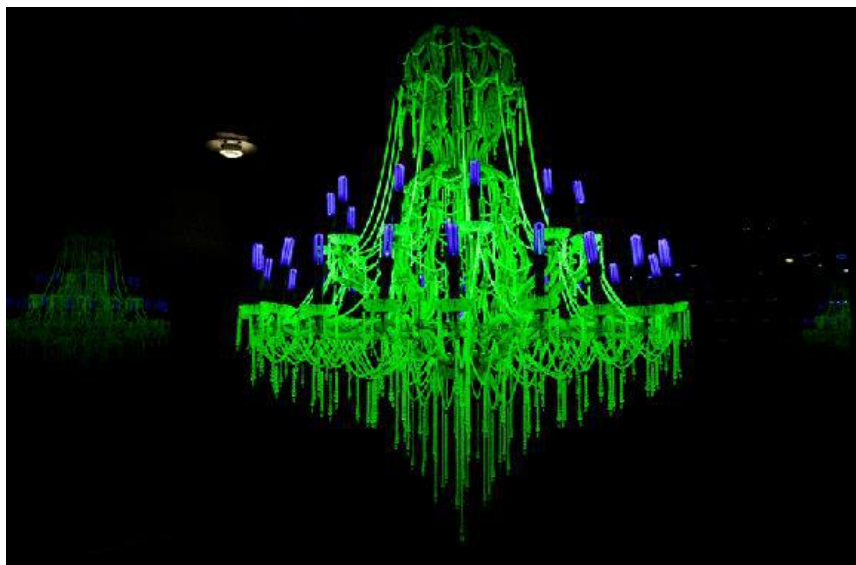


Figura 4. Lustre fabricado com vidro de urânio exposto à luz UV. Parte da exposição *What the Birds knew*, dos artistas Ken e Julia Yonetani.

2 A descoberta da radioatividade e novos elementos químicos

No presente capítulo, os temas abordados são os primeiros sinais da radioatividade percebidos pelo homem, a descoberta de que os sais de urânio são radioativos e a grande contribuição de Marie Curie não só para o mundo da ciência, mas para toda a humanidade.

2.1 Os primeiros indícios da radioatividade

O início da exploração da radioatividade é mais uma comprovação da capacidade de observação e da genialidade humana. A radioatividade foi estabelecida a partir de observações experimentais no fim do século XIX e início do XX, época onde os recursos eram precários, e contribuiu de forma fantástica para a evolução da ciência.

No início a radioatividade era considerada um fenômeno que envolvia mistério, magia e encantamento⁹. Não podia ser explicada por nenhuma teoria até então desenvolvida, e por esta razão despertava o interesse de muitos cientistas já empolgados com o progresso científico vivenciado naqueles tempos. A maioria dos cientistas da época já havia deixado de lado a ideia de que todo o conhecimento pode ser adquirido apenas através de experiências, ou seja, o empiricismo, e também já não se conformavam em aceitar que alguns fenômenos fossem simplesmente casos divinos. Esse pensamento fez com que muitos cientistas se lançassem no desconhecido para desvendar mistérios até então inexplicáveis, sendo a radioatividade um dos principais desafios.

A descoberta da radioatividade passa pelos tubos de raios catódicos construídos por Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), em 1869, e pela determinação da razão entre a massa e a carga do elétron realizada por Joseph John Thompson (1856-1940), em 1897, utilizando tubos de Hittorf aprimorados por Eugen Goldstein (1850-1931) e William Crookes (1832-1919). As primeiras observações sobre este fenômeno foram consideradas durante experimentos com os tubos de Hittorf⁹.

Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) estudava o experimento de Thompson utilizando tubos aprimorados, em agosto de 1895, em seu laboratório, na cidade de Würzburg, Alemanha. Ele queria detectar a radiação eletromagnética de alta frequência calculada por Helmholtz. Röntgen também observou um fenômeno já

descrito pelo físico Philip Lenard (1862-1947), no qual os raios catódicos que escapavam do tubo iluminavam a superfície de um objeto localizado a certa distância do tubo; a superfície iluminada continha uma camada de material fosforescente. Röntgen então empacotou o tubo com uma caixa de papelão preto, ligou sua instrumentação à eletricidade e apagou todas as luzes de seu laboratório. Após todo esse procedimento, ele percebeu que uma placa contendo uma camada de material fosforescente (tetracianoplatinato(IV) de bário) posicionada a certa distância de sua instrumentação emitia luz, e isso acontecia até mesmo quando a camada de material fosforescente estava situada oposta à instrumentação⁹.

Naquela época os cientistas já sabiam que os raios catódicos gerados nos tubos de Crookes eram propagados apenas no vácuo. A partir dessa informação Röntgen concluiu que os raios capazes de iluminar o material fosforescente consistiam em um novo tipo de raio invisível. Este novo raio tinha poder para atravessar materiais opacos à luz e a outras radiações conhecidas, que eram os raios catódicos, ultravioleta e infravermelho. Röntgen ficou extremamente empolgado com a nova descoberta e concebeu experimentos para analisar as propriedades e características do novo raio descoberto. Durante esses estudos, Röntgen expôs diversos materiais com diferentes densidades a fim de determinar a capacidade de penetração do raio, e com o auxílio de um detector de fluorescência, ele notou uma propriedade muito interessante. Após segurar um disco de chumbo com as mãos a fim de estudar o poder de penetração dos raios no metal, ele percebeu que junto à silhueta do disco de metal, também estava presente a silhueta dos ossos de sua mão. Assim se iniciaram os estudos sobre a radiografia⁹.

Röntgen precisava divulgar sua descoberta para o mundo e para comprovar suas observações ele passou a utilizar placas fotográficas para revelar a silhueta dos objetos expostos à radiação. As placas fotográficas eram capazes de registrar de forma duradoura as imagens formadas, pois continham uma camada de nitrato de prata que, sob o efeito da radiação, tinha o íon Ag^+ reduzido a Ag^0 ; dessa forma o local exposto à radiação apresentava tonalidade de cor mais clara, enquanto que a parte não atingida continuava com a tonalidade mais escura. O mundo da ciência não tinha informações sobre os novos raios descobertos por Röntgen e por esse motivo ele os nomeou como raios x. Em dezembro de 1895 ele aplicou a recém-descoberta técnica da radiografia na mão de sua esposa e criou uma das fotografias mais célebres da história da ciência (Figura 5)⁹.

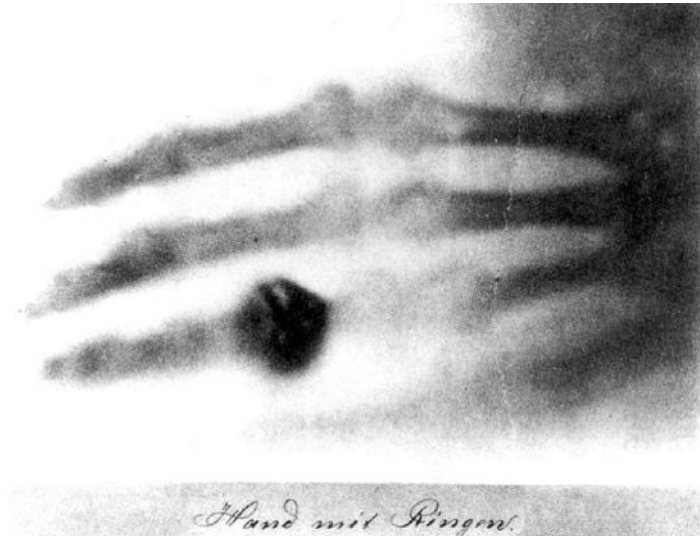


Figura 5. *Mão com anel.* Radiografia da mão de Anna Bertha Ludwig, esposa de Wilhelm C. Röntgen. Acervo do Instituto de Física da Universidade de Würzburgo.

2.2 O grande passo da radioatividade

O mundo científico ficou extremamente fascinado com a nova descoberta de Röntgen e os raios x despertaram o interesse de muitos cientistas que passaram a estudá-los a fim de caracterizar suas propriedades. Muitos trabalhos sobre o assunto foram publicados nesta época e uma hipótese elaborada por Jules Henri Poincaré (1854-1912) provocou a curiosidade de outros cientistas. A hipótese de Poincaré dizia que a emissão dos raios x tinha relação com a fluorescência apresentada pelo vidro do tubo de Crookes, pois para ele o vidro se tornava fluorescente justamente porque emitia os raios, e ele ainda questionou se todos os corpos fluorescentes também eram capazes de emitir radiação x, independente da causa da fluorescência.

Naquela época a fluorescência era um fenômeno relativamente novo e se tornou alvo de muitos estudos. Um dos grandes nomes da ciência que se dedicaram a experimentos sobre este fenômeno foi Antoine Henri Becquerel (1852-1908), que vinha de uma família de cientistas, como seu avô, Antonie César Becquerel e seu pai, Alexandre Edmond Becquerel. Outras personalidades da ciência que se dedicaram a esta área foram Charles Henry (1867-1923) e Gaston Niewenglowski (1860-1909), que realizaram experimentos com substâncias fosforescentes e verificaram que os sulfetos de zinco e de cálcio emitiam radiações penetrantes idênticas aos raios x, comprovando a hipótese de Poincaré. Alguns trabalhos

realizados na época com vaga-lumes e outros materiais como papel, açúcar e madeira, também caracterizavam essas substâncias como capazes de emitir radiação penetrante, o que hoje sabemos se tratar de um equívoco⁹.

Nesse período agitado da ciência, Henri Becquerel analisava o sulfato duplo de urânio e potássio $[K_2UO_2(SO_4)_2]$ e observou que este sal apresentava fosforescência similar a dos raios x e tinha poder de penetração capaz de marcar a sombra de objetos em placas fotográficas. Nessa mesma época o físico inglês Silvanus Phillips Thompson (1851-1916) constatou um fenômeno parecido enquanto realizava experimentos com o nitrato de urânio⁹.

Após esses resultados eles passaram a considerar que a radiação proveniente dos compostos de urânio era idêntica à radiação ultravioleta, e podia se tornar mais forte caso aqueles compostos fossem expostos ao Sol, confirmando um tipo de fosforescência. Porém, essa consideração não estava em concordância com a lei de Stokes, a qual afirmava que a radiação emitida por um corpo deve ter comprimento de onda maior que a radiação absorvida por esse corpo. Dessa forma, um corpo que absorvesse a radiação ultravioleta do Sol não era capaz de emitir a mesma radiação, mas os dois pesquisadores pensaram se tratar de uma situação de violação dessa lei.

Henri Becquerel comprovou experimentalmente que a radiação do urânio tem características semelhantes às da luz, pois sofre refração, reflexão e polarização. Por isso, ele propôs que os raios emitidos pelo urânio se tratavam de uma radiação intermediária entre os raios x e a radiação ultravioleta comum, dando o nome de “hiperfosforescência” para esta radiação⁹.

Becquerel estudou e descobriu muitas propriedades do novo raio, mas ele não sabia que uma das principais propriedades, talvez a principal, ele iria descobrir de forma acidental. Ele sabia que os sais de urânio deviam ser expostos à radiação solar, para em seguida, quando postos em contato com uma placa fotográfica, fossem capazes de marcar a silhueta de objetos na placa, e dessa forma ele confirmaria que a radiação emitida pelo urânio era do mesmo tipo que a radiação descoberta por Röntgen.

Em fevereiro de 1896, Becquerel preparou todo o experimento, mas como em muitos dias do inverno europeu, a luz do sol não era forte o suficiente para irradiar a amostra de sais de urânio. Ele então aguardou pela luz solar e após alguns dias; quando o Sol finalmente reapareceu, Becquerel se apressou para realizar o

experimento, mas ele decidiu examinar as placas fotográficas antes de realizar os procedimentos, pois as placas eram muito sensíveis e poderiam ter sido danificadas pela umidade, o que causaria interferência no resultado do experimento⁹.

O fato mais surpreendente ocorreu após Becquerel revelar as placas fotográficas. Ele reparou que as placas estavam marcadas justamente no local onde a amostra de sais de urânio estava depositada, mas o fato disso acontecer sem que a amostra tivesse contato com a radiação solar o deixou realmente perplexo. Ele também reparou que o local onde um objeto metálico estava situado entre a amostra de sais e a placa fotográfica apresentava uma marcação enfraquecida com a silhueta do objeto, o que significava que as marcações na placa não ocorriam devido ao contato direto entre os sais e a placa, mas que os sais de urânio emitiam uma radiação espontaneamente, capaz de atravessar o objeto metálico usado por Henri Becquerel.

Um dos primeiros fatos marcantes da radioatividade aconteceu quando Henri Becquerel, de forma acidental, descobriu que os sais de urânio podiam deixar marcas na placa fotográfica mesmo quando as amostras não eram irradiadas com a luz solar. Com base nessa observação, muitas outras substâncias fosforescentes foram testadas, mas somente o urânio apresentou capacidade de marcar a placa fotográfica, levando Becquerel a pensar que esta propriedade era única do urânio. Ele também descobriu que os “raios Becquerel” (nome dado à radiação descoberta por ele, antes do nome radioatividade) podia ionizar o ar que o cercava, fazendo com que o ar fosse capaz de conduzir eletricidade. Essa descoberta causou mais um avanço na história da radioatividade, pois possibilitou que a radiação emitida por algumas substâncias fosse medida com o auxílio de um eletroscópio (instrumento capaz de identificar pequenas cargas de natureza eletrostática), dando maior exatidão do que o método com placas fotográficas, pois as placas podiam ser danificadas pela temperatura, umidade, pressão e outras substâncias químicas.

Becquerel também foi a primeira pessoa a relatar os danos causados pela radioatividade ao corpo humano. Durante um estudo para caracterizar as propriedades do rádio, em 1898, ele notou que uma amostra radioativa causava um desconforto em sua pele, primeiro gerando uma mancha vermelha, que foi se intensificando até surgir uma ferida difícil de cicatrizar⁹.

2.3 A descoberta de novos elementos e a consolidação da radioatividade

Marie Sklodowska Curie (1867-1934) vinha de uma família polonesa. Ela se mudou para Paris em 1891 e morou com sua irmã e seu cunhado até completar seus estudos na Universidade de Paris. Enfrentando muitas dificuldades e sobrevivendo com poucos recursos, alguns relatos dizem que Marie chegou até a desmaiar de fome, mas ela conseguiu obter os diplomas de graduação em Física (1893) e Matemática (1894). Em 1895 ela se casou com Pierre Curie (1859-1906), experiente pesquisador que realizava trabalhos sobre a piezoelectricidade (um fenômeno em que cristais produzem eletricidade quando submetidos a alguma tensão). As primeiras pesquisas realizadas por Marie Curie foram encomendadas pela Sociedade de Encorajamento da Indústria Nacional e tratava sobre o magnetismo de alguns tipos de aços industriais. No ano de 1897, Marie deu à luz sua primeira filha, Irène. Com 30 anos de idade nessa época, ainda era uma pessoa desconhecida no mundo da ciência¹⁰.

No mesmo ano de 1897, apoiada por Pierre Curie, Marie decidiu se matricular para o doutorado na Universidade de Paris, título que nenhuma mulher havia conquistado até então. Naquela época, apenas a defesa da tese era necessária para conquistar o título e impulsionada por Henri Becquerel, ela escolheu a radiação emitida pelos compostos de urânio como tema para a tese de seu doutorado. A radioatividade não era uma área muito explorada naquele momento e até o termo “radioatividade” ainda não havia sido mencionado, sendo Maria Curie a primeira pessoa a usá-lo, em meados de 1898. A radiação emitida pelos sais de urânio era explicada por Becquerel como um tipo de “fosforescência invisível” e como já era um fenômeno antes explorado, o próprio Becquerel decidiu se dedicar a outras linhas de pesquisa¹⁰.

Marie deu início a seus estudos analisando a condutividade elétrica que esses compostos causavam no ar, pois quando um sal de urânio era colocado perto de um objeto eletrizado, o mesmo era descarregado. Para realizar essas medidas, Marie utilizou um instrumento fabricado com cristais de quartzo piezoelétrico desenvolvido por Pierre Curie¹¹.

A escolha de Marie por utilizar o instrumento inventado por Pierre para analisar os compostos de urânio foi uma decisão muito inteligente, visto que as

placas fotográficas não davam confiabilidade aos resultados, pois não era possível identificar se os raios emitidos pelos compostos de urânio eram diferentes de outras radiações invisíveis, mas empregando esse método ela observou que outras substâncias que aparentemente também emitiam uma radiação invisível, como giz, açúcar e papel, não tornavam o ar condutor de eletricidade⁹.

Todos os compostos de urânio examinados por Marie eram capazes de tornar o ar condutor de eletricidade, ela também observou que esse efeito dependia apenas da quantidade de urânio presente nos compostos, não apresentando relação com outros elementos e nem com a estrutura cristalina dos compostos analisados. Marie resolveu então analisar todos os compostos e minerais que existiam no laboratório em que ela trabalhava para verificar se outro elemento tinha propriedade semelhante. Após muitos ensaios ela conseguiu identificar outro elemento capaz de ionizar o ar, o tório¹⁰.

A descoberta de que o tório emitia radiações da mesma forma que o urânio já havia sido relatada dois meses antes pelo físico alemão Gerhard Carl Schmidt (1865-1949), mas isso de forma alguma diminuiu o trabalho de Marie Curie, pois ela continuou analisando outras substâncias e deu mais um grande passo para a história da radioatividade. Marie também observou que além do urânio e do tório, o cério, o nióbio e tântalo ionizavam fracamente o ar¹¹.

Marie Curie analisou uma grande quantidade de minerais e, como era esperado, todos os minerais contendo urânio e tório tornavam o ar condutor elétrico. Um fato, porém, deixou Marie muito intrigada: ela notou que alguns minerais eram capazes de emitir radiações mais intensas que o urânio ou o tório puro. Um exemplo da observação de Marie Curie foi a calcolita natural (fosfato de cobre e de urânio), que apresentava radiação duas vezes mais intensa que o urânio metálico. Para investigar mais a fundo essa observação ela decidiu sintetizar a calcolita a partir de substâncias puras, e constatou que o minério artificial era tão radioativo quanto os sais de urânio analisados, mas era menos radioativo que o urânio puro. Essa constatação fez com que Marie desconfiasse da existência de outro elemento químico mais radioativo que o urânio, e ainda desconhecido, presente nos minérios naturais¹¹.

A possibilidade de trabalhar com um elemento químico desconhecido incentivou mais ainda Marie a continuar com sua tese, e até Pierre Curie que apenas

acompanhava as pesquisas de Marie, resolveu deixar seus projetos um pouco de lado para se dedicar totalmente ao trabalho de sua esposa.

Em abril de 1898 o casal Curie levantou a hipótese de que a radioatividade estudada por eles era uma propriedade atômica¹⁰, característica de alguns átomos, que podiam emitir essas radiações espontaneamente, independentes de seu estado físico. A continuidade de seus estudos se deu com base nessa nova ideia e eles abandonaram a hipótese da fosforescência invisível de Becquerel, pois os elementos radioativos tinham essa propriedade na presença, ou não, do Sol. Enquanto outros elementos simplesmente não eram capazes de emitir radiação, independente do tratamento que recebessem. A hipótese de radioatividade elaborada pelo casal Curie foi alterada muitos anos depois, quando a radioatividade artificial foi comprovada.

Marie continuou analisando a radioatividade de alguns minerais e percebeu que a pechblenda era quatro vezes mais intensa que o urânio puro. Seguindo a hipótese elaborada pelo casal, eles desconfiaram da presença, em pequena quantidade, de um elemento fortemente radioativo e desconhecido nesse mineral¹¹. Apesar de se tratar apenas de uma hipótese, o casal resolveu trabalhar insistentemente para tentar isolar esse elemento do mineral e durante meses empregaram todos os seus esforços nesse projeto.

As pesquisas do casal Curie faziam parte de um projeto extremamente audacioso, pois a descoberta de um novo elemento químico era um marco muito importante para a história da ciência, e fazer isso a partir de uma nova propriedade atômica, como a radioatividade, realçava esse marco. A chance dos resultados serem negativos e que nenhum elemento novo fosse descoberto era real, mas a possibilidade da nova descoberta deixou o casal Curie muito motivado.

Marie Curie utilizou diversos procedimentos químicos conhecidos para separar os elementos da pechblenda e analisou a radioatividade de cada substância que conseguia isolar do mineral. Após muitos esforços, ela conseguiu obter um composto com características semelhantes às do bismuto, mas que emitia uma radiação muito intensa, enquanto o bismuto conhecido não emitia radiação. A partir desse momento a hipótese dos Curie começou a se confirmar, eles poderiam ter formulado uma nova ideia e mencionar que o mesmo elemento poderia existir em uma forma radioativa e outra não (o que foi confirmado anos mais tarde), mas essa ideia batia de frente com a primeira hipótese formulada, e eles continuaram a

pesquisa convictos de que um novo elemento químico radioativo estava presente no composto de bismuto, e que esse elemento precisava ser separado¹⁰.

O casal Curie se dedicou duramente na tarefa de isolar o novo elemento, mas fracassaram em muitas tentativas. A parceria de Marie e Pierre nessa jornada foi tanta que muitas vezes as letras dos dois se alternavam nas anotações do caderno de laboratório. Após muitos processos de separação, eles não conseguiram obter o novo elemento completamente puro, e a substância isolada ainda se parecia com o bismuto, porém a radioatividade dessa substância era 400 vezes mais intensa que a do urânio. Seguindo a hipótese da presença de um novo elemento misturado na substância isolada, o nome dado a esse novo elemento foi “polônio”, em homenagem à terra natal de Marie Curie, Polônia. Naquela época a Polônia não era um país independente e vivia sob o domínio do Império Russo. Com o nome dado por Marie para o novo elemento, ela conseguia chamar a atenção para a crise vivida naquela região e dessa forma, o polônio foi, provavelmente, o primeiro elemento químico usado para expor uma situação política¹¹.

As tentativas em isolar as substâncias da pechblenda continuaram e com a ajuda de Gustave Bémont (1857-1937), o casal Curie conseguiu separar mais uma substância radioativa. Após uma série de processos de separação, eles conseguiram isolar uma substância altamente radioativa e com propriedades químicas semelhantes às do bário, e desconfiaram da presença de outro elemento químico ainda desconhecido. Novamente eles não conseguiram separar esse elemento da mistura com o bário, mas conseguiram aumentar a concentração desse material radioativo e identificaram a presença de uma substância 900 vezes mais radioativa que o urânio puro. Devido a sua enorme radioatividade, eles deram o nome de “rádio” a esse novo elemento¹¹.

Marie e Pierre precisavam comprovar a descoberta desses novos elementos para consagrar de vez seus trabalhos. Eles decidiram então realizar uma análise decisiva para a identificação de elementos químicos, verificar o espectro dos novos materiais encontrados. Quando uma substância vaporizada sofre uma descarga elétrica, essa substância emite radiação constituída por linhas luminosas coloridas. Ao conjunto dessas linhas é dado o nome de espectro, e cada elemento químico possui um espectro específico, chamado de espectro atômico. O casal Curie esperava encontrar espectros diferentes, dos já conhecidos, para o bismuto

radioativo e para o bário radioativo. Esses espectros confirmariam em definitivo a hipótese do casal.

Eugène Dermaçay era um físico que trabalhava com Marie, especialista em espectroscopia, ele realizou os testes para o casal. Após muitos esforços, Eugène não conseguiu encontrar nenhuma raia diferente no espectro do bismuto radioativo, causando uma frustração em todos; porém, a maior consagração ainda estava por vir. Realizando o mesmo teste para o bário radioativo, Eugène conseguiu identificar uma raia espectral diferente de todas conhecidas até então, e isso era um forte indício da existência de um novo elemento químico, o rádio⁹. O casal Curie apresentou seu trabalho sobre a descoberta do rádio na Academia de Ciências de Paris no dia 26 de dezembro de 1898.

Após essa descoberta, Marie estava decidida a continuar sua pesquisa e nos quatro anos seguintes, de 1899 até 1902, o principal foco de seu trabalho foi isolar o polônio e o rádio da pechblenda, tentando obter esses elementos na forma mais pura possível para determinar suas propriedades, principalmente o peso atômico (hoje, massa molar). Durante esse período, Marie tratou aproximadamente uma tonelada de pechblenda, realizando diversos procedimentos físicos e químicos, mas infelizmente ela não conseguiu isolar o polônio, que resistiu a todos os procedimentos adotados por Marie; em contrapartida, ela conseguiu isolar aproximadamente um décimo de grama de cloreto de rádio quase puro e determinou o peso atômico do rádio como aproximadamente 225¹¹.

A perseverança de Marie Curie foi fundamental para que ela conseguisse o sucesso em seu trabalho, ela não desistiu mesmo quando as coisas pareciam não avançar. Ela teve o merecido reconhecimento de seu trabalho e recebeu o prêmio Nobel de Física em 1903 por seus trabalhos com a radioatividade, na verdade ela recebeu um quarto desse prêmio, já que seu marido, Pierre Curie, recebeu também um quarto do prêmio, e Henri Becquerel ficou com a outra metade. Confirmando a importância do trabalho de Marie, ela voltou a receber um prêmio Nobel em 1911, dessa vez de Química, pela descoberta do polônio e do rádio e pela descrição das propriedades deste último. Ela se tornou a primeira pessoa a receber duas vezes o prêmio Nobel¹¹.

A pesquisa de Marie Curie interessou a muitos outros cientistas, que passaram a estudar o fenômeno chamado radioatividade. O casal Curie (Figura 6) era referência nessa área, mas a continuidade de seu trabalho logo passou para

outras mãos, como o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) e o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956), que trabalhavam no Canadá quando propuseram a teoria aceita até hoje sobre a radioatividade, dizendo que “os átomos dos elementos radioativos se desintegram lentamente, emitindo radiações e se transformando em outros elementos químicos”¹¹.

Marie Curie enviuvou em 1906, quando Pierre foi atropelado por uma carruagem, mas ela continuou sua tarefa. Durante a Primeira Guerra Mundial, Marie se dedicou à aplicação médica dos raios x nos campos de batalha, e prosseguiu se dedicando à ciência, trabalhando para obter fundos, treinando novos pesquisadores, coordenando novas pesquisas e proporcionando condições de trabalho aos jovens. Marie veio a falecer em 4 de julho de 1934, aos 66 anos de idade. A provável causa de sua morte foi leucemia decorrente da exposição à radioatividade por anos¹¹.

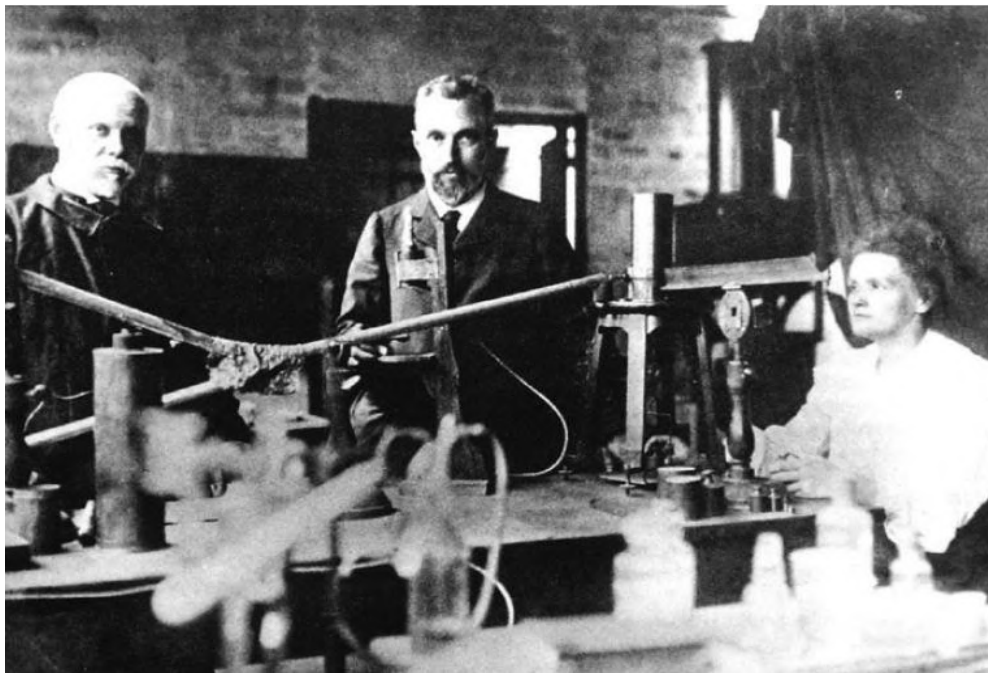


Figura 6. Marie Curie, Pierre Curie (ao centro) e o técnico de laboratório (à esquerda). Marie realizava medidas com o eletrômetro, instrumento utilizado para medir a ionização do ar provocada pela radioatividade, em 1904. Obtida do portal da Enciclopédia Britânica.

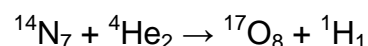
3 A fissão nuclear e o Projeto Manhattan: a origem do urânio depletado

Os principais assuntos tratados no presente capítulo são a descoberta de uma característica peculiar do isótopo urânio-235, os esforços para a obtenção do mesmo a partir do urânio natural, sua aplicação na geração de energia nuclear e o grande projeto elaborado pelo governo dos EUA durante a Segunda Guerra Mundial, com objetivo de construir a bomba atômica.

3.1 A descoberta que colocou o urânio na liderança da energia nuclear

Marie Curie iniciou uma nova era na ciência com seus trabalhos sobre a radioatividade, e paralelamente aos seus estudos, Pierre realizou alguns estudos, junto com Albert Laborde (1872-1936), sobre o calor emitido espontaneamente pelo rádio. O artigo publicado por eles foi fundamental para a descoberta da enorme quantidade de energia contida nos átomos¹¹.

Muitos anos se passaram e as pesquisas sobre a radioatividade também avançaram, possibilitando a descoberta de novos elementos químicos, de diferentes tipos de radiação e das leis de desintegração radioativa. Durante esse período o físico Ernest Rutherford (1871-1937) realizou alguns experimentos sobre a transmutação radioativa artificial, no qual os núcleos de certos átomos foram bombardeados com partículas alfa provenientes de elementos radioativos, como no exemplo a seguir, onde um átomo de nitrogênio é atingido por um átomo de hélio (partícula α), transformando a estrutura do nitrogênio que imediatamente emite um próton (núcleo de hidrogênio) e produz um isótopo estável do oxigênio⁹.



Os trabalhos realizados naquela época resultaram em grandes descobertas. Foi possível identificar a presença de novas partículas atômicas como o nêutron, o pósitron e o neutrino. A descoberta do nêutron foi fundamental para a comprovação do fenômeno da isotopia, uma propriedade dos elementos na qual os núcleos possuem o mesmo número atômico, mas diferentes números de massa⁹.

Em dezembro de 1938, os químicos alemães Otto Emil Hahn (1879–1968) e Friedrich Wilhelm Strassmann (1908–1980) realizavam experimentos com urânio no Instituto de Química Kaiser Wilhelm, em Berlim. Eles usavam nêutrons para bombardear átomos de urânio e produzir elementos mais pesados, inexistentes na natureza, chamados de transurânicos. Após analisar o urânio bombardeado, os cientistas encontraram átomos de bário. O físico Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) narrou como Otto Hahn explicou para ele o que havia acontecido: “O bário é bem menor do que o núcleo de urânio e, se do urânio surgiu o bário, então é porque o núcleo explodiu. Foi exatamente assim que Hahn me explicou pelo telefone sua inesperada descoberta”¹².

A explosão do núcleo de urânio significou a descoberta da fissão nuclear por Hahn e o início de toda uma ciência voltada para a geração de energia nuclear, porém a responsável por decifrar esse fenômeno foi a física austríaca Elise Meitner (1878–1968), conhecida como Lise, uma pesquisadora que trabalhou por muitos anos com Hahn no instituto berlinense¹².

Para a produção de energia por fissão nuclear, uma reação em cadeia deve ser estabelecida. Nesta reação, os nêutrons emitidos na fissão de um núcleo impulsionam a fissão de outros núcleos, desta forma o processo pode se manter de forma independente. O elemento químico natural capaz de sofrer fissão e que possa ser empregado como combustível nuclear deve possuir meia-vida de milhões de anos, pois caso contrário, devido ao decaimento, este material já não existiria mais na Terra. A produção de elementos fissionáveis artificiais é possível, mas o urânio é encontrado na natureza e atende todas as propriedades necessárias¹³.

O urânio é o único elemento encontrado na natureza capaz de sofrer fissão nuclear, mas somente um de seus isótopos, o de massa 235, se fissiona após absorver um nêutron (Figura 7). O isótopo de massa 238 não sofre fissão nuclear, mas ele pode ser transformado em um elemento passível de fissão, sendo por isso classificado como um isótopo fértil. Após ser bombardeado por um nêutron e emitir duas radiações beta, o urânio-238 se transforma em plutônio-239, isótopo físsil que possui tempo de meia-vida de aproximadamente 24 mil anos^{13,14}.

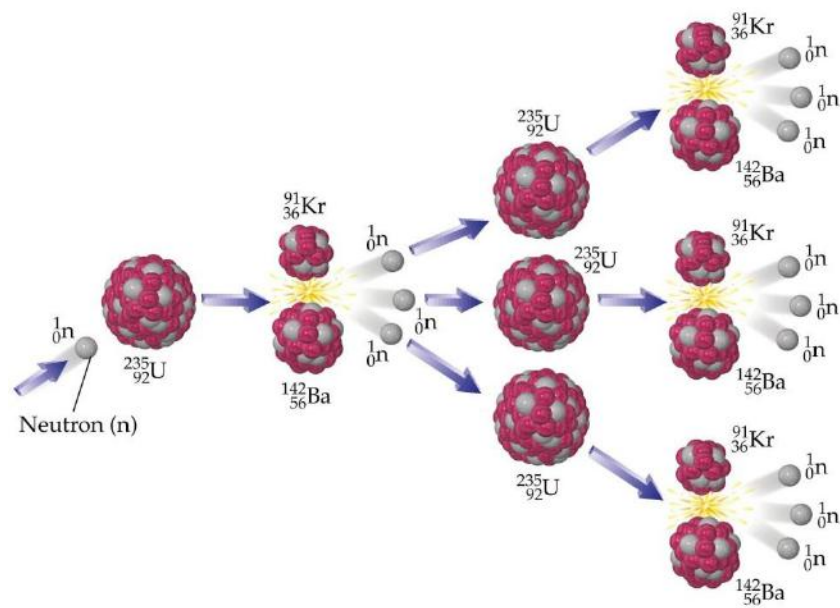


Figura 7. Exemplo da reação em cadeia iniciada pelo impacto de um nêutron contra o urânio-235. Obtida do blog Parque da Ciência.

Grande parte dos reatores para produção de energia nuclear utiliza urânio natural enriquecido como combustível. O urânio enriquecido tem a concentração de urânio-235 elevada de 0,7% para aproximadamente 3% m/m ou mais. Essa quantidade de urânio-235 é suficiente para dar início à reação de fissão em cadeia que será sustentada pela produção de plutônio-239. O urânio-233 também é capaz de sofrer fissão nuclear, e apresenta tempo de meia-vida de 160 mil anos. Ele pode ser produzido a partir do tório natural (massa 232). A meia-vida do tório é de 13,9 bilhões de anos; ele é muito abundante na crosta terrestre, cerca de três vezes mais que o urânio. Alguns reatores experimentais que empregam o tório como combustível já foram testados, e a utilização desse elemento se mostrou muito favorável. Além disso, o urânio-233, produzido a partir do tório, é de fácil detecção e apresenta maiores dificuldades para transporte em relação ao plutônio-239, limitando a chance de ser desviado para fins bélicos. Outra vantagem de se utilizar o tório como combustível nuclear é devido aos resíduos gerados, que apresentam radioatividade significativa por apenas algumas centenas de anos, possibilitando seu armazenamento e monitoramento^{13,14}.

De volta para o século XX, pouco tempo depois da descoberta da fissão do urânio, a Segunda Guerra Mundial (1939–1945) eclodiu. Meitner, Hahn e Strassmann já sabiam que a fissão do urânio, induzida por nêutrons, viabilizava uma

reação em cadeia capaz de liberar enorme quantidade de energia, podendo ser empregada na geração de energia elétrica e na construção de bombas. E foi o que aconteceu, pois os estudos sobre energia nuclear foram direcionados para a construção de armas nucleares¹².

Durante a guerra, devido à perseguição dos nazistas, Lise Meitner, que era judia, fugiu para a Suécia, e de lá enviou cartas explicando o fenômeno descoberto por Hahn. Em 1944, Otto Hahn recebeu o Prêmio Nobel de Química pela descoberta, mas Lise não recebeu nenhum reconhecimento por sua contribuição. Hahn sofreu muito ao ver sua descoberta ser utilizada para a construção de bombas, e segundo Weizsäcker, Hahn teria dito diversas vezes que cometeria suicídio caso a tecnologia da bomba fosse parar nas mãos de Adolf Hitler (1889-1945). Após a guerra, Hahn se tornou um grande ativista na luta contra armas nucleares¹².

3.2 Os esforços para isolar o urânio-235 e o Projeto Manhattan

A descoberta da fissão nuclear do urânio também trouxe novos desafios para os cientistas que trabalhavam nessa área. Com o conhecimento da grande quantidade de energia contida nos átomos, muitos pesquisadores se esforçaram para encontrar uma forma de isolar o isótopo físsil de massa 235, de controlar a reação em cadeia iniciada pelo impacto de nêutrons nesse isótopo, e conseqüentemente, produzir energia nuclear.

A energia nuclear, infelizmente, também pode ser empregada para a construção de armas, e com o início da Segunda Guerra Mundial, as pesquisas dessa área foram encaminhadas para esse objetivo. Os países envolvidos na guerra, principalmente Alemanha e Estados Unidos, iniciaram uma corrida para desenvolver a tecnologia nuclear, e dessa forma empregá-la na construção de armas. Apesar de os Estados Unidos não estarem envolvidos desde o início da guerra, o governo americano elaborou um projeto para buscar o controle da fissão nuclear e para a construção de armas nucleares, o projeto ficou conhecido como Projeto Manhattan, e teve como motivação inicial uma carta enviada ao então presidente norte-americano Franklin Delano Roosevelt (1882–1945) assinada por Albert Einstein (1879–1955), mas que representava a preocupação de grandes nomes da ciência. A carta enviada no dia 2 de agosto de 1939 é apresentada a seguir¹⁵.

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

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

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

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

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

- a) abordar os Departamentos Governamentais, mantê-los informados sobre o desenvolvimento e apresentar recomendações para a ação do Governo, dando especial atenção ao problema de garantir fornecimento de minério de urânio para os Estados Unidos;
- b) acelerar o trabalho experimental, que está atualmente sendo feito dentro dos limites dos orçamentos dos laboratórios das universidades, fornecendo fundos, caso sejam necessários, pelo contato com pessoas privadas dispostas a contribuir para esta causa, talvez, inclusive, buscando a cooperação de laboratórios industriais que têm o equipamento necessário.

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

Atenciosamente,

Albert Einstein.

Em 12 de outubro de 1939, o presidente Roosevelt autorizou o governo a financiar pesquisas atômicas relacionadas à produção de energia elétrica. Esse fato foi fundamental para o desenvolvimento do que viria a ser o Projeto Manhattan. O trabalho inicial tinha o controle da reação em cadeia do urânio-235 como principal finalidade, dessa forma seria possível a geração de energia elétrica¹⁵.

As pesquisas voltadas para a construção de um reator nuclear mobilizou muitos cientistas como Lyman James Briggs (1874–1963), Enrico Fermi (1901–1954), Leo Szilard (1898–1964), Eugene Paul Wigner (1902–1995) e Arthur Holly

Compton (1892–1962), e foi desenvolvido em algumas universidades dos EUA, como as Universidades de Chicago, Columbia e Princeton¹⁵.

Após três anos de pesquisas, finalmente, no dia 2 de dezembro de 1942, um reator nuclear capaz de suportar a reação autossustentável do urânio-235 funcionou pela primeira vez nas proximidades de Chicago. O reator, chamado de Chicago Pile 1 (CP-1), gerou aproximadamente 2 kW de energia, sendo suficiente para Enrico Fermi constatar que o experimento havia sido um sucesso¹⁵.

No dia 7 de dezembro de 1941, antes mesmo do funcionamento do primeiro reator nuclear de urânio, os EUA foram surpreendidos por forças japonesas que atacaram a base militar de Pearl Harbor, na ilha de Oahu, Havaí. Após esse ataque, os EUA entraram na guerra e aumentaram cada vez mais os esforços para o desenvolvimento de novas armas, aplicando a mesma tecnologia utilizada na construção do CP-1 em pesquisas ultrassecretas que estavam sendo realizadas em Los Alamos, Novo México, mas com o objetivo de construir uma bomba atômica¹⁵.

O Projeto Manhattan contou com a participação das forças armadas dos EUA e muitos cientistas que haviam fugido da Europa por causa da guerra, alguns já envolvidos na construção do reator CP-1. O projeto foi liderado pelo general Leslie Richard Groves (1896–1970) e pelo físico Julius Robert Oppenheimer (1904–1967)¹⁵. A mobilização em volta do projeto foi tão grande que cerca de 200 mil pessoas estiveram envolvidas, como químicos, físicos, engenheiros, administradores e trabalhadores de diferentes áreas. A criação de uma instalação fabril em Oak Ridge, Tennessee, foi necessária, onde ocorreu a realização da maior parte dos trabalhos^{15,16}.

A atuação de milhares de pessoas e diversas pesquisas sendo realizadas em fabricas e laboratórios espalhados pelos EUA, algumas localidades do Canadá e Reino Unido (Figura 8), fizeram com que as autoridades se preocupassem com a espionagem (Figura 9), pois o segredo em volta do projeto deveria ser mantido para que nenhuma informação importante caísse em mãos inimigas^{15,16}.



Figura 8. Algumas localidades onde o Projeto Manhattan foi desenvolvido. Retirada do Wikipedia.



Figura 9. Outdoor incentivando o sigilo entre os trabalhadores de Oak Ridge. *O que você vê, faz e escuta aqui, deixe aqui quando você for embora.* Obtida do portal do jornal Daily Mail, matéria publicada em 26/10/2013.

O desafio primordial do Projeto Manhattan foi, sem dúvida, a produção de urânio-235 em quantidade suficiente para sustentar uma reação em cadeia, visto que o urânio natural possui apenas 0,7% em massa de urânio-235. Um grande

esforço foi realizado para a obtenção de urânio com 95% m/m do isótopo 235, proporção necessária para a produção de armas¹⁵.

O processo de enriquecimento do urânio têm diversas etapas, e muitas delas foram desenvolvidas justamente durante o Projeto Manhattan, no qual o método utilizado para elevar a concentração de urânio-235 foi a difusão gasosa. Esse método se baseia na efusão molecular através de poros microscópicos no sentido de menor pressão, seguindo a lei de efusão de Graham, a qual afirma que a velocidade de efusão é inversamente proporcional à raiz quadrada da massa molar¹⁵.

Antes de passar pelo processo de enriquecimento, o urânio deve ser preparado para atravessar, em forma de gás, os difusores responsáveis pela separação dos isótopos. Após a extração das rochas sedimentares com urânio, a separação dos elementos é realizada por solventes químicos nas usinas de beneficiamento, onde todo o urânio é convertido e concentrado em óxido de urânio (U_3O_8), um sólido amarelado, conhecido como *yellowcake*. O óxido de urânio é então convertido em UF_6 , que sofre sublimação a 56,5 °C, e passa pelos difusores. A diferença de massa entre o $^{235}UF_6$ e $^{238}UF_6$ gera uma pequena diferença de velocidade na difusão dessas moléculas, sendo necessário o uso de muitas barreiras de efusão para o enriquecimento do urânio^{5,14}.

As barreiras de efusão utilizadas no Projeto Manhattan foram construídas com níquel, devido à alta resistência desse metal à corrosividade do UF_6 . Acredita-se que foram construídos 5.174.000 módulos individuais, com 10.175 km de comprimento. A quantidade de níquel utilizada foi tão grande que parte do níquel foi emprestado pelo tesouro nacional, fundido e empregado na construção dos efusores^{15,16}.

Em 16 de julho de 1945, às 05 h 29 min, quatro anos após o início do Projeto Manhattan e quarenta e sete anos após o início dos estudos de Marie Curie, foi realizada a explosão da primeira bomba atômica da história. No teste conhecido como “Trinity”, a bomba atômica de plutônio “Gadget” foi lançada sobre o deserto próximo a Los Alamos, Novo México. A detonação foi equivalente à explosão de cerca de 20 quilotons de TNT, ou seja, 20 mil toneladas de TNT¹⁵.

Alguns dias após o teste “Trinity”, em 6 de agosto de 1945, a bomba de U-235 “Little Boy” foi lançada sobre a cidade de Hiroshima, no Japão. Com poder de 15 quilotons, devastou a cidade e causou, no mínimo, 70 mil mortes no momento da explosão. O mesmo ocorreu no dia 9 de agosto, na cidade de Nagasaki (Figura 10),

com a bomba de plutônio “Fat Man”, que tinha poder explosivo de 21 quilotons, e matou, no mínimo, 40 mil pessoas no momento da explosão, deixando outras 25 mil feridas. Além das mortes causadas no momento da explosão, muitas gerações posteriores sofreram e ainda sofrem problemas de saúde acarretados pelo efeito da radioatividade presente naquelas bombas subitamente liberada para o ambiente¹⁵.

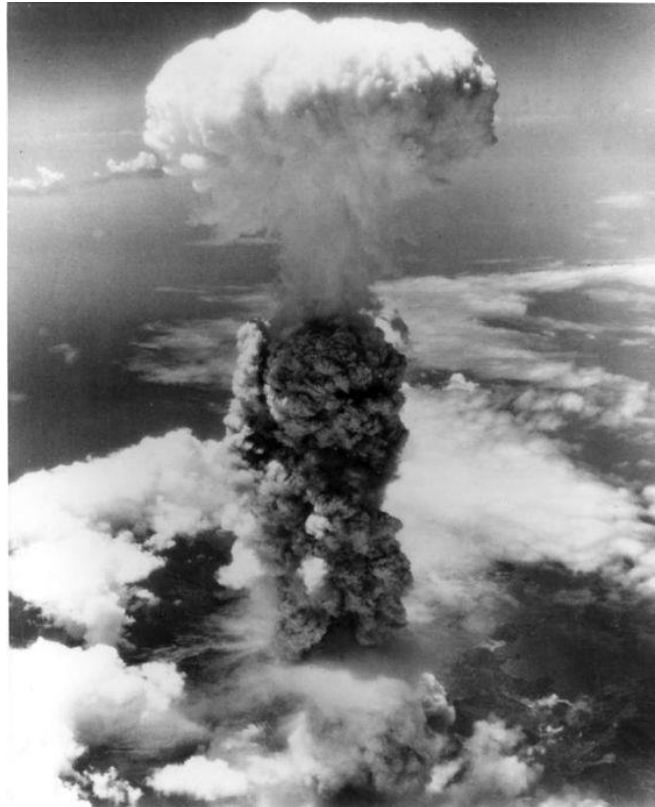


Figura 10. Nuvem de fumaça lançada após a explosão da bomba atômica em Nagasaki, 9 agosto de 1945. Obtida do portal da biblioteca Harry S. Truman, da Universidade de Missouri.

A explosão dessas bombas causou uma grande comoção mundial, o elevado número de mortes instantâneas, somado ao fato de que a Alemanha nazista já havia se rendido em maio daquele ano, levantou o questionamento se o uso das bombas realmente era necessário, fazendo com que muitos cientistas que participaram do projeto se tornassem grandes ativistas contra o uso de armas nucleares.

Após o Projeto Manhattan, outra tecnologia para o enriquecimento de urânio foi desenvolvida, chamada de ultracentrifugação (Figura 11). Esta tecnologia também utiliza o gás UF_6 para enriquecer o urânio, no qual o gás é submetido a uma rotação em velocidades extremas. As moléculas compostas pelo isótopo de massa 235, mais leve, se concentram na parte superior da centrífuga, e são enviadas para uma nova centrífuga, onde o processo se repete, a fim de aumentar a concentração de urânio 235. Enquanto as moléculas compostas pelo isótopo de massa 238, mais pesado, se concentram na parte inferior da centrífuga e são descartadas gerando o urânio depletado. Essa é hoje a tecnologia que domina o processo de enriquecimento do urânio^{17,18}.

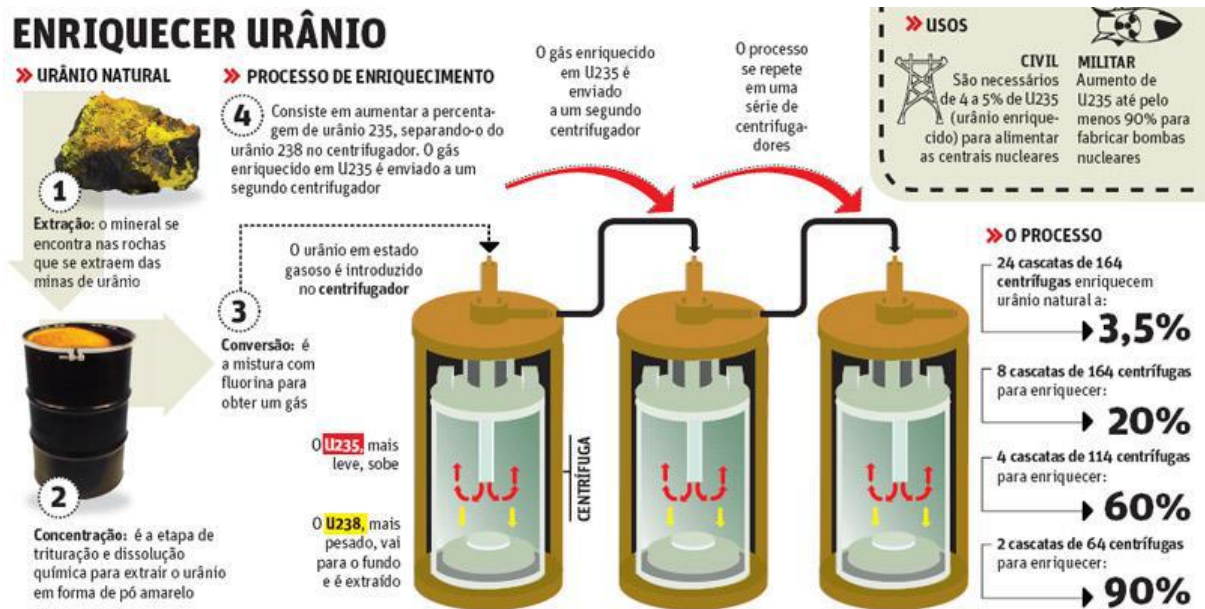


Figura 11. Esquema de ultracentrifugação, outra técnica utilizada para enriquecer urânio, e consequentemente, gerar mais urânio depletado. Obtida do portal do jornal O Tempo, matéria publicada em 09/03/2010.

4 O urânio depletado

O presente capítulo mostra um levantamento sobre algumas características e aplicações do urânio depletado, como suas propriedades radioativas, suas aplicações militares, o uso comprovado em guerras, os possíveis efeitos ao ser humano e ao ambiente e as possibilidades para diminuir os impactos causados.

4.1 Propriedades radioativas do urânio depletado

O urânio depletado (UD), se distingue do urânio natural devido à baixa concentração de urânio-235: enquanto no urânio natural a concentração do isótopo 235 é de aproximadamente 0,7% m/m, no UD esse valor chega a no máximo 0,3%. Como resultado, a atividade do UD é cerca de 40% menor que a do urânio natural (Tabela 4). O urânio depletado é dez milhões de vezes menos radioativo que o ^{241}Am , usado na produção de detectores de fumaça^{3,19}.

O urânio depletado também pode conter traços do isótopo 236, formado quando o urânio-235 é bombardeado com nêutrons, e isso ocorre quando o mesmo equipamento é utilizado para manipular tanto o urânio radioativo, quanto o depletado. O urânio-236 também pode ser encontrado na natureza devido às atividades nucleares realizadas pelo homem, como o teste de bombas atômicas, o acidente de Chernobyl e o descarte de lixo nuclear, sendo o último um problema que afeta inclusive o Brasil (Anexo A.3). A análise de algumas munições penetrantes fabricadas com UD coletadas no Kosovo apresentou traços de ^{236}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{237}Np e ^{99}Tc , que por se tratar de traços, contribuem muito pouco para a atividade do urânio depletado^{3,19}.

Tabela 4. Comparação da atividade radioativa entre o urânio natural e o urânio depletado com 0,2% de urânio-235.

Fonte: BLEISE, 2003³.

Isótopo	Atividade em 1 mg de urânio natural (Bq/mg)	Atividade em 1 mg de urânio depletado (Bq/mg)
^{234}U	12,40	2,26
^{235}U	0,57	0,16
^{238}U	12,40	12,40
Total	25,28	14,80

4.2 Grandes estoques mundiais

O processamento de uma tonelada de urânio natural para o uso em reatores nucleares e a geração de energia elétrica, produz aproximadamente 130 kg de urânio enriquecido. Todo o subproduto, chamado de urânio empobrecido, composto praticamente pelo isótopo 238, é armazenado como UF₆, principalmente na França, Rússia e EUA (Tabela 5), ou é novamente convertido para U₃O₈, pois o óxido é menos tóxico e apresenta menos riscos, sendo mais adequado para armazenamento em longo prazo. Anualmente, são produzidas cerca de 50 mil toneladas de urânio empobrecido, a maior parte em países da Europa, Rússia e EUA, somando-se ao estoque mundial de urânio depletado que é de aproximadamente 1,6 milhões de toneladas¹⁹.

Uma parcela do grande estoque de urânio empobrecido é utilizada para diluir o urânio altamente enriquecido (com mais de 90% de urânio-235) proveniente de programas de armas nucleares, e dessa forma poder utilizar o urânio em reatores nucleares para a produção de energia elétrica. O material oriundo de armas nucleares é diluído na proporção de aproximadamente 25:1 com urânio empobrecido¹⁹.

Tabela 5. Estimativa do estoque de UD em alguns países no ano 2008.

Fonte: World Depleted Uranium Inventory Map²⁰.

País	Estoque aproximado de UD em toneladas			
	UF ₆	U ₃ O ₈	Metal	Total
EUA	470.000	10.000		480.000
Rússia	450.000	10.000		460.000
França	50.000	140.000		190.000
Reino Unido	30.000			30.000
Alemanha e Holanda	16.000			16.000
Japão	10.000			10.000
China	2.000			2.000
República da Coreia	200			200
África do Sul	4	69		73
Total	1.028.204	160.069		1.188.273

4.3 Usos alternativos para o urânio depletado

O urânio depletado possui uma elevada densidade e, dessa forma, ele é utilizado como material de proteção para outros materiais radioativos, por exemplo, no revestimento de reatores nucleares para a produção de energia elétrica, onde a interação com os nêutrons gerados na reação em cadeia produz o ^{239}Pu , outro combustível nuclear. Outra aplicação do urânio depletado como protetor da radioatividade é na blindagem de câmeras de radiografia industrial: o UD é utilizado como escudo para proteger os operadores da radiação gama emitida por uma fonte de alta intensidade. O escudo fabricado com UD é envolvido por espuma de poliuretano para proteção térmica, mecânica e de oxidação. Escudos de UD também são utilizados na proteção de operadores de máquinas de raios-x em hospitais^{3,19}.

O urânio empobrecido também foi utilizado como aditivo fluorescente na produção de porcelana para próteses dentárias, com a intenção de simular a fluorescência dos dentes naturais, mas essa aplicação foi descontinuada devido aos riscos tóxicos do ponto de vista químico desse elemento. O UD também é utilizado na produção de reagentes de urânio para uso em laboratórios químicos, como por exemplo, o acetato de uranila, usado em microscopia eletrônica e na química analítica para identificação de sódio. Em 1999, a empresa francesa fabricante de esmaltes Cristallerie de Saint-Paul, produziu um esmalte amarelo com 10% de urânio empobrecido. O UD utilizado na fabricação do pigmento foi vendido pela usina militar Cogema-Pierrelatte, que cessou as vendas de urânio empobrecido para produtores de esmalte e vidro em fevereiro de 2000¹⁹.

Outras aplicações do urânio depletado foram a fabricação de quilhas para veleiros e de lastros para aeronaves. O lastro é utilizado para dar equilíbrio às asas de um avião e manter a aeronave estabilizada. O uso de UD na fabricação de lastros foi bastante contestado devido aos prováveis impactos à saúde humana e ao meio ambiente, pois durante um acidente aéreo o urânio pode sofrer combustão com chama, difundindo-se pela área do sinistro. Na década de 1970 foram fabricados Boeings-747 contendo de 400 kg a 1500 kg de urânio depletado, mas já na década seguinte o uso de urânio foi descontinuado, sendo substituído pelo tungstênio. Alguns acidentes com aeronaves contendo urânio já ocorreram em pelo menos três ocasiões, a serem comentados a seguir^{3,19,21}.

O primeiro acidente ocorreu em março 1977, na ilha de Tenerife, Espanha. Foi um das maiores tragédias da aviação, no qual dois Boeings-747 se chocaram na

pista de decolagem, causando 563 mortes. Com o incêndio causado pela colisão foram queimadas cerca de três toneladas de urânio depletado, mas ao que tudo indica, não houve relatos de contaminação da população e do meio ambiente causado pelo urânio liberado²¹.

O segundo acidente ocorreu em outubro 1992, próximo ao aeroporto de Amsterdã, Holanda (Figura 12). Pouco tempo depois da decolagem o Boeing-747 do voo El Al-1862 apresentou falha em dois de seus motores e se chocou com dois prédios residenciais, causando 43 mortes. Durante o incêndio causado após a colisão foram queimados cerca de 150 kg de urânio empobrecido. Alguns anos após o acidente surgiram muitos casos de pessoas com problemas físicos e mentais na região próxima ao acidente. Muito se pensou que esses problemas eram causados pela exposição das pessoas aos resíduos gerados pelo incêndio, principalmente o urânio que se espalhou naquele dia, mas após um estudo realizado em 2000 foi constatado que a exposição das pessoas daquela região aos resíduos gerados no acidente foi muito baixa, não apresentando risco comprovado à saúde delas²¹.



Figura 12. Fotografia área do local do acidente com o voo El Al-1862, em outubro de 1992, Amsterdã, Holanda. Fonte: Plane Crash Info.

O terceiro acidente ocorreu em dezembro de 1999, próximo ao aeroporto de Stanstead, Inglaterra. Um Boeing-747 usado no transporte de cargas caiu minutos antes do pouso, incendiando-se e espalhando uma grande quantidade de urânio empobrecido. O acidente causou quatro mortes (a tripulação do avião)²².

Por volta dos anos 2000, lastros construídos com urânio depletado também foram empregados na fabricação de carros de Fórmula 1. Os engenheiros responsáveis pela fabricação dos carros buscavam a construção de carros cada vez mais leves, dessa forma, o lastro devia ser localizado em áreas muito específicas. Devido à alta densidade do urânio depletado, ele foi o metal escolhido para a fabricação dos lastros de alguns carros, que continham até 80 kg do metal. Apesar dos grandes estoques de UD, o uso de urânio para aplicação civis tem acesso muito limitado, o que fez com que algumas equipes de Fórmula 1 fossem até a Rússia em busca do metal²³.

4.4 Aplicações militares

No início da década de 1970 o exército dos EUA começou a realizar pesquisas com novos materiais para a construção de munições e a blindagem de tanques. A alta densidade de materiais como o tungstênio ($19,3 \text{ g cm}^{-3}$) e o urânio (19 g cm^{-3}) foi levada em consideração. No final das pesquisas o urânio depletado foi escolhido devido à sua disponibilidade, preço e piroforicidade (capacidade de um material, quando finamente dividido, entrar em combustão no ambiente, levando o material a atingir a temperatura de autoignição). O tungstênio apresenta ponto de fusão $3410 \text{ }^\circ\text{C}$, muito maior que o do urânio, $1132 \text{ }^\circ\text{C}$, mas o tungstênio praticamente não é pirofórico. Apesar dessas propriedades, os projéteis de tungstênio perdem a ponta afilada durante o impacto, se mostrando menos efetivo na perfuração de materiais de blindagem do que o urânio^{3,21}.

O processo para a fabricação de munições de urânio depletado passa pelo endurecimento do urânio através da redução do teor de carbono e da adição de até 0,75% m/m de titânio para formar uma liga metálica. A alta temperatura gerada no momento do impacto pode incendiar a superfície de urânio empobrecido dos projéteis (principalmente nos impactos em aço), devido à baixa temperatura de fusão do urânio em relação à temperatura alcançada durante o impacto. Outra vantagem dos projéteis de urânio é que eles são afiados durante a fusão que ocorre no momento do impacto e são capazes de perfurar blindagens poderosas^{3,24}.

Os impactos dos projéteis de urânio empobrecido causam perfurações caracterizadas por buracos de entrada pequenos e circulares. O projétil de uma munição 30-mm fabricado com urânio empobrecido é capaz de perfurar uma blindagem de aço com até 9 cm de espessura. Os projéteis de 30-mm são formados por um corpo cônico (penetrador) de urânio empobrecido com 95 mm de comprimento, 16 mm de diâmetro da base e aproximadamente 280 g (Figura 13). O corpo de UD é envolvido por uma peça de alumínio formando um projétil com 30 mm de diâmetro (Figura 14). O urânio depletado também é empregado como parte da blindagem dos tanques utilizados pelo exército dos EUA. Placas fabricadas com UD são inseridas entre as placas de aço da blindagem convencional^{3,24}.



Figura 13. Modelo 3D de uma munição de urânio empobrecido. Obtida do portal CG Trader.

Após serem disparados de uma metralhadora, os projéteis de UD atingem o solo em linha reta e, dependendo do ângulo de colisão, podem perfurar até 3 m do solo. Quando um projétil de UD atinge blindagens muito resistentes (Figura 15), o corpo de urânio perfura a peça de alumínio, deixando a mesma para trás. No momento do impacto, podem ser formadas partículas de urânio empobrecido, que se dispersam e contaminam o ambiente. Algumas estimativas apontam que entre 10% a 35%, chegando a um máximo de 70%, do urânio em um projétil são convertidos em poeira de UD após o impacto em uma blindagem ou quando o urânio é incendiado. A poeira de urânio formada durante o impacto têm partículas menores

que 5 μm , dessa forma, as partículas são mantidas no ar durante muito tempo, e se espalham de acordo com a direção do vento³.

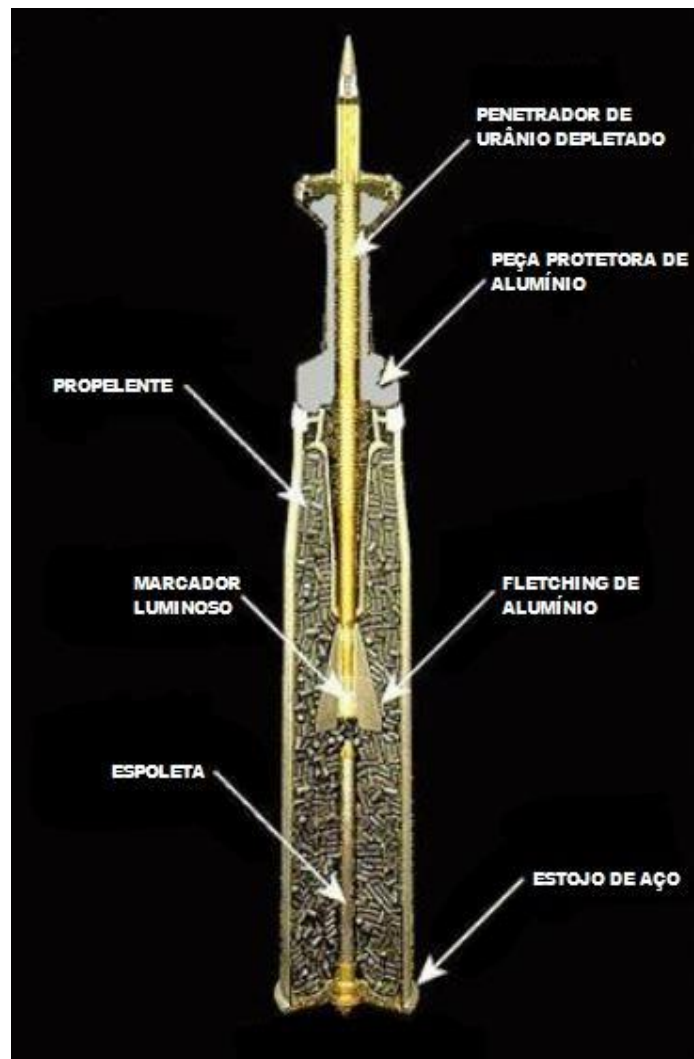


Figura 14. Corte vertical e composição de uma munição traçante de urânio depletado. Adaptada do portal da International Coalition to Ban Depleted Uranium.



Figura 15. Tanque iraquiano completamente perfurado por projéteis 30-mm e 120-mm de urânio depletado. ANDREWS, 2003²⁵.

Após um ataque com munições de urânio empobrecido, o UD é oxidado e os alvos atingidos são reconhecidos devido às partículas pretas de óxido de urânio que se depositam no chão e em superfícies ao seu redor. Alguns testes indicaram que a maior parte da poeira de urânio pode se espalhar dentro de uma região com raio de 100 m de distância do alvo atingido, mas em casos extremos, na presença de uma forte corrente de ar e um período considerável de tempo após o ataque, foram encontradas partículas de UD a 40 km do alvo atacado²⁵.

O impacto de projéteis de urânio em solos e alvos menos resistentes, como areia, argila e veículos não blindados, perfuram no mínimo 50 cm do alvo atingido, mas por se tratar de substâncias de baixa resistência, a poeira de urânio gerada não é suficiente para contaminar o ambiente ao redor do alvo²⁵.

O projétil de urânio que fica depositado no solo pode sofrer corrosão dependendo da composição e das propriedades químicas do meio em que o mesmo se encontra; por exemplo, em areais de quartzo, granito ou rochas vulcânicas ácidas, ocorre a solubilização do urânio em proporções bastante consideráveis, sendo capaz até de contaminar as águas de um lençol freático próximo à região atacada, o que irá espalhar o urânio por um grande território. As partículas de urânio também podem ser adsorvidas em alguns tipos de solo ou substâncias, como em solos argilosos e matéria orgânica, essa adsorção é capaz de reduzir a mobilidade das partículas e dessa forma, reduzir o perigo de ressuspensão e distribuição do urânio no ambiente²⁴.

4.5 Emprego comprovado em guerras

Na presente seção são abordados os históricos de alguns conflitos na região do Golfo Pérsico e na antiga Iugoslávia, onde é comprovado o uso de munições fabricadas com urânio depletado. São apresentados alguns números em relação à quantidade de urânio depletado utilizado naquelas regiões.

4.5.1 *Guerras no Golfo Pérsico*

Iniciada em agosto de 1990, a Primeira Guerra do Golfo foi motivada pela invasão de tropas iraquianas ao Kuwait devido a questões petrolíferas e territoriais. Durante os primeiros meses de 1991, para proteger o Kuwait, países como Inglaterra, França, Egito, Síria e Arábia Saudita entraram na guerra liderados pelos Estados Unidos. Munições fabricadas com urânio empobrecido foram massivamente utilizadas pelas forças armadas dos EUA. Estima-se que a força aérea norte-americana disparou 783.514 munições 30-mm produzidas com UD, totalizando aproximadamente 259 toneladas de urânio. O exército disparou 9.552 tiros através de tanques, contabilizando aproximadamente 50 toneladas de urânio, enquanto o uso de munições pela marinha correspondeu à cerca de 10 toneladas de urânio. A Inglaterra é o único país, que se tem conhecimento, o qual também utilizou munições de urânio empobrecido além dos EUA. O ministério de defesa do Reino Unido estima que foram disparados 100 munições 120-mm por tanques, correspondendo a aproximadamente uma tonelada de UD³. Ao que tudo indica, a Guerra do Golfo foi o único combate onde uma grande parcela de munição de UD foi disparada por tanques, e foi o conflito no qual a maior quantidade de urânio empobrecido foi utilizada, com somas totais superando 321 toneladas²¹.

Em março de 2003 os EUA voltaram a atacar o Iraque, mas dessa vez, em solo iraquiano. O contexto da Segunda Guerra do Golfo foi a guerra global contra o terrorismo, motivada após os ataques de 11 de setembro nos Estados Unidos. O objetivo da invasão era derrubar o governo ditatorial de Saddam Hussein (1937–2006), com o argumento de devolver o Iraque ao povo iraquiano. Durante os ataques, estima-se que o exército norte-americano disparou cerca de 10 mil tiros com munição de UD, entre diversos calibres, correspondendo a valores totais superiores a 60 toneladas de urânio. Os alvos atacados com munições de UD em 2003 não foram apenas tanques ou veículos blindados e o exército quebrou algumas regras criadas pelos próprios EUA, o qual estabeleceu, em 1975, que o uso de urânio empobrecido deveria ocorrer somente em conflitos de alta complexidade e para atacar veículos blindados^{26,27}. Algumas fontes apontam que os EUA também fizeram uso de urânio empobrecido durante ataques ao grupo terrorista Estado Islâmico, na Síria, em 2015, mas esses dados não foram confirmados pelo governo norte-americano²⁷.

4.5.2 Guerra civil na Iugoslávia

A guerra civil na antiga República Socialista Federativa da Iugoslávia, também chamada de Guerra dos Bálcãs, foi uma série de conflitos brutais que ocorreram na região do sudeste europeu durante 1991 a 2001. A ex-Iugoslávia era formada por algumas regiões que viviam sob a ditadura do governo iugoslavo, mas após o fim da União Soviética, os países que faziam parte da ex-Iugoslávia buscaram a separação do regime ditatorial para dessa forma se tornarem países independentes, porém, o governo da antiga Iugoslávia impediu que a separação ocorresse de forma pacífica. A Guerra dos Bálcãs deu origem a sete novos países, que são a Eslovênia, Croácia, Bósnia & Herzegovina, Montenegro, Macedônia, Sérvia e Kosovo (este último de reconhecimento limitado)²⁸.

O conflito na região da Bósnia & Herzegovina ocorreu entre 1994 e 1995, e aproximadamente 10.800 tiros com munição de UD foram disparados em ataques aéreos realizados pelas tropas OTAN, totalizando cerca de 3 toneladas de urânio. A maioria dos disparos ocorreu próximo à cidade de Sarajevo (Figura 16), capital da Bósnia & Herzegovina. O uso de urânio empobrecido também ocorreu durante a Guerra do Kosovo, entre os anos de 1998 e 1999. Alguns relatórios da OTAN apontam que 30 mil tiros com munições de UD foram disparados em ataques aéreos em 112 localidades próximas a fronteira do Kosovo, correspondendo a aproximadamente 10 toneladas de urânio^{3,28}.



Figura 16. Criança pendurada no cano de um tanque em Sarajevo. Obtida do portal do jornal Los Angeles Times, matéria publicada em 06/04/2012.

4.6 Efeitos sobre o ser humano e o ambiente

Desde que o urânio depletado passou a ser empregado em campos de batalha, muitas questões foram levantadas sobre o aumento de casos de câncer, leucemia e outras doenças em tropas militares, na população civil atingida e em agentes de ONGs que estavam presentes nos locais de combates, principalmente relacionando a investigações das causas dessas doenças estarem ligadas ao uso de urânio empobrecido. Apesar de muitos estudos comprovarem os riscos que o UD pode causar ao ser humano^{29,30}, outras pesquisas também mostraram que a relação entre o uso de urânio depletado e o aumento das doenças é infundada²⁴.

Após o impacto de projéteis de urânio em alvos resistentes e conseqüentemente, a formação de partículas de UD, os principais óxidos formados são UO_2 , U_3O_7 e U_3O_8 . As soluções do corpo humano, que naturalmente dissolvem diversas substâncias, também funcionam como solvente pra os óxidos formados pelo urânio empobrecido. A dissolução dos três óxidos no corpo humano ocorre de forma bem lenta, mas uma vez dissolvido, o urânio pode reagir na forma de íon urânio (UO_2^{+2}) com moléculas biológicas, causando a necrose e danificando as células dos rins, acarretando na perda de eficiência da filtração de impurezas do sangue (nefrite)²⁵.

A inalação de partículas de urânio geradas após um ataque com munições de UD é a principal forma de introdução desse metal no organismo, mas ele também pode ser ingerido por via oral, via águas contaminadas. Quando ingerido por via oral, entre 2% e 5% das partículas de urânio são dissolvidas no sangue pelo intestino, enquanto o restante é eliminado rapidamente do corpo por via intestinal. Em seguida à dissolução, aproximadamente 90% do urânio é removido pelos rins e excretado pela urina em até uma semana, os 10% restantes são absorvidos pelo sangue e distribuídos por outras partes do corpo, como os ossos, o fígado, o pulmão, os rins, gorduras e tecido muscular. Quando inalado, o urânio não dissolvido pode permanecer por muitos anos no pulmão, especificamente as partículas menores que 2 μm , sendo depositadas nos brônquios e nos alvéolos. Progressivamente, essas partículas entram na corrente sanguínea e são eliminadas pela urina. Aproximadamente todas as partículas inaladas maiores que 10 μm se depositam nas vias aéreas superiores, principalmente na faringe. O esqueleto é a parte do corpo humano onde o urânio permanece por mais tempo após a contaminação de uma pessoa, sendo encontrado até 25 anos após a inalação de partículas³.

O urânio empobrecido apresenta duas formas de perigo biológico para o ser humano, sendo a infecção toxicológica muito maior que a infecção radiológica, assim como outros metais tóxicos. O órgão que sofre o maior risco de ser danificado após uma infecção são os rins. Levando em consideração que a pior exposição sofrida por tropas do exército dos EUA durante a Guerra do Golfo foi de 10 mSv (o Sievert (Sv) é a unidade de medida usada para dar uma avaliação do impacto da radiação ionizante sobre os seres humanos), o perigo radiológico apresentado pelo urânio depletado, tanto interna quanto externamente, é em muitos casos negligenciado. Para efeitos de comparação, esse valor é menor que um quinto da dose de radiação considerada maléfica para a saúde humana³.

Após a Primeira Guerra do Golfo, 20 mil soldados norte-americanos foram monitorados; desse montante, apenas 25 apresentavam complicações nos rins que poderiam ter sido causadas pela exposição ao urânio empobrecido. Entretanto, nenhum desses soldados está entre os 33 que sofreram as maiores exposições ao UD. Devido a esse fato, o número de soldados com complicações renais é semelhante à taxa de pessoas diagnosticadas com problemas renais na população civil americana. Estudos similares foram realizados com outros veteranos de guerra e civis em diversas localidades onde o UD foi empregado, mas apresentaram o mesmo resultado: não se evidenciaram elevadas taxas de urânio no corpo dessas pessoas e nem correlação de doenças à exposição ao urânio. Um estudo realizado com veteranos da Guarda Nacional do Mississippi analisou a influência do urânio empobrecido nos filhos desses soldados, mas nenhuma evidência foi encontrada sobre problemas de saúde ou após o nascimento dessas crianças²⁴.

Apesar de não existirem provas que o urânio depletado influenciou diretamente na saúde de pessoas que foram expostas a esse metal durante a guerra, também existem estudos capazes de comprovar que o urânio empobrecido é, sim, maléfico à saúde humana³⁰, fazendo com que muitas pessoas e instituições ao redor do mundo lutem pelo fim do uso do urânio depletado em armamentos²⁷.

A poeira de UD gerado após o impacto de munições em alvos resistentes pode contaminar o ambiente, assim como os projéteis e fragmentos que atingem o chão e a água em regiões atacadas. Com essa preocupação, o Programa Ambiental das Nações Unidas realizou uma avaliação em 11 localidades do Kosovo onde o urânio depletado foi intensamente empregado. Durante essa avaliação, foi analisada a superfície do solo, regiões entre 10-20 cm e 10-50 m do subsolo, a água e plantas.

Os resultados da análise mostraram que não foi possível detectar uma quantidade significativa de urânio empobrecido nessas localidades, sendo impossível diferenciar o urânio depletado do urânio natural. Por conseguinte, conclui-se que os riscos radiológicos e toxicológicos eram insignificantes ou inexistentes²⁸.

4.7 Possibilidades para diminuir o impacto causado pelo urânio depletado

Na sociedade atual existem muitos debates sobre as formas de se obter energia a partir de fontes renováveis, e por muito tempo a energia nuclear foi considerada uma fonte barata, pois todos os danos que a sua exploração pode causar ao meio ambiente não eram levados em consideração. Hoje em dia, muitos dos países que fazem uso da energia nuclear já realizam estudos a fim de encontrar uma solução para geração de energia de fonte sustentável, como a solar e a eólica, e diminuir cada vez mais a dependência da energia nuclear³¹.

O enriquecimento do urânio para ser empregado na geração de energia nuclear é a principal forma de produção de urânio depletado, mas essa exploração do urânio pode causar danos irreparáveis para a natureza. Como exemplo, a mina de Caldas, no estado de Minas Gerais, onde a extração de urânio ocorreu de 1982 até 1995, deixou uma área de aproximadamente 700 mil metros quadrados contaminada com rejeitos radioativos, sendo calculado que cerca de 500 milhões de dólares e 40 anos serão necessários para recuperar a área. Até hoje nenhum órgão governamental investiu recursos para esse fim, mostrando que a energia nuclear pode se constituir em uma fonte extremamente cara³².

O estoque mundial de urânio depletado possui grandes quantidades e não precisa se expandir mais. A maior parte desse urânio se encontra como UF_6 , um gás altamente corrosivo e tóxico, mas que pode ser reconvertido em U_3O_8 , diminuindo o risco de vazamentos e acidentes, outro perigo enfrentado pelas regiões próximas às usinas nucleares. Como a história não pode ser alterada e muito urânio depletado já foi produzido, cabe aos órgãos competentes o devido tratamento e estocagem, de forma responsável e consciente, diminuindo os impactos ao planeta Terra, que já foi muito explorado.

5 Considerações finais

A ciência possui histórias capazes de deixar qualquer pessoa fascinada: a explicação para muitos fenômenos da natureza, a descoberta de novos elementos químicos, a cura para diversas doenças, a possibilidade de visitar outros planetas e o sequenciamento do DNA humano são apenas alguns pequenos exemplos dos benefícios que a ciência trouxe para a humanidade. A evolução da ciência é só mais uma prova da curiosidade e da capacidade do ser humano de sempre de se superar e buscar horizontes cada vez mais largos.

Ao mesmo tempo em que a ciência pode trazer benefícios imensos à sociedade, ela também pode promover catástrofes e deixar pontos negativos marcados para sempre na história da humanidade. O uso de armas químicas, as bombas atômicas lançadas durante a Segunda Guerra Mundial, a poluição desenfreada e irresponsável e o uso de substâncias para o envenenamento de pessoas através de correspondências são exemplos do mau uso da ciência.

Apesar da capacidade humana de realizar o bem, mas de também prejudicar o próximo, o fato de que um elemento químico e sua propriedade mais importante foram e ainda são capazes de revolucionar a história é realmente impressionante. Toda a influência política, econômica e social causadas pelo urânio é algo surpreendente, mas que não é muito abordada nas escolas e na sociedade, talvez, se fosse mais debatido, poderia incentivar mais avanços tecnológicos em prol de benefícios para o ser humano e o meio ambiente.

O uso do urânio depletado pode ser considerado como o aproveitamento de um rejeito, porém as consequências desse aproveitamento podem ser muito prejudiciais ao planeta Terra e seus habitantes, já que mesmo sabendo dos malefícios que o urânio pode causar ao ambiente, milhares de munições fabricadas com esse metal foram disparadas em alguns conflitos armados no final do século XX e início do XXI. Apesar do monitoramento dos soldados que tiveram contato com o urânio depletado indicar que o urânio não causou mal aos sobreviventes dessas guerras, o mais importante, e que pode ter sido negligenciado, seria o monitoramento dos civis que ainda vivem naquelas regiões, pois esses ainda estão muito próximos do urânio despejado naqueles conflitos.

Mesmo que muitos estudos mostrem que o urânio depletado usado naqueles conflitos não fez mal aos sobreviventes, movimentos como a *International Coalition to Ban Uranium Weapons* lutam contra o uso de urânio em qualquer tipo de armamento, e nós, como profissionais da ciência, em particular da química, devemos nos esforçar cada vez mais para encontrar soluções e criar ideias sustentáveis, capazes de fazer o uso responsável e consciente dos elementos químicos, bem como das aplicações científicas, a fim de proteger o planeta Terra, a nossa e as futuras gerações.

6 Referências

1. WEEKS, M.E.; The discovery of elements V, **Journal of Chemical Education**, Kansas, v.9, n.3, p. 464-467, mar. 1932.
2. **The Cosmic Origins of Uranium**. Disponível em <http://www.worldnuclear.org/informationlibrary/nuclearfuelcycle/uraniumresources/thecosmicoriginsofuranium.aspx>, acessado em 06/03/2017.
3. BLEISE, A.; DANESI, P. R.; BURKART, W.; Properties, use and health effects of depleted uranium (DU): a general overview, **Journal of Environmental Radioactivity**, Vienna, v. 64, p. 93-112, 2003.
4. ZÁVODSKÁ, L.; KOSORÍNOVÁ, E.; LESNÝ, J.; Environmental chemistry of uranium. HV ISSN 1418-7108: HEJ Manuscript No: ENV-081221-A, p. 1-18, 2008.
5. PIRES, F. R. M.; **Urânio no Brasil: Geologia, Jazidas e Ocorrências**, Rio de Janeiro: Eletrobrás Eletronuclear, 2013.
6. OLIVEIRA, M. A.; **Prospecção, pesquisa e produção de urânio no Brasil: planejamento, busca e resultados**, Rio de Janeiro: ESG, 2011.
7. EMSLEY, J.; "Uranium". *Nature's Building Blocks: An A to Z Guide to the Elements*. Oxford: Oxford University Press. pp. 476–482, 2001.
8. HAMMOND, C. R.; The Elements, in *Handbook of Chemistry and Physics 81st edition*. CRC press. p. 31-32, 2000.
9. LIMA, R. S.; PIMENTEL, L. C. F.; AFONSO, J. C.; O Despertar da Radioatividade ao Alvorecer do Século XX. **Química Nova na Escola**. História da Química, v. 33, n. 2, p. 93-99, maio 2011.

10. CARVALHO, F. P.; Marie Curie and the Discovery of Radium, **The New Uranium Mining Boom**, Department of Radiological Safety and Protection, Sacavém, Springer 2011.
11. **Marie Curie e a Radioatividade.** Disponível em <http://www.ghtc.usp.br/Biografias/Curie/Curieinic.htm>, acessado em: 04/08/2017.
12. **1938: Otto Hahn descobre a fissão nuclear do urânio.** Disponível em <http://www.dw.com/pt-br/1938-otto-hahn-descobre-a-fissao-nuclear-do-uranio/a-359236>, acessado em 18/07/2017.
13. **Por que se usa urânio na fissão nuclear e não outros elementos?** Centro de Referência para o Ensino de Física. Disponível em <https://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1292>, acessado em 13/07/2017.
14. **How uranium ore is made into nuclear fuel.** Disponível em <http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/how-is-uranium-ore-made-into-nuclear-fuel.aspx>, acessado em: 11/07/2017.
15. A História da Bomba Atômica e seu Genocídio Instantâneo. Disponível em <https://super.abril.com.br/historia/a-historia-da-bomba-atmica-e-seu-genocidio-instantaneo/>, acessado em: 14/07/2017.
16. KIERNAN, D. **As Garotas da Cidade Atômica: A história secreta das mulheres que ajudaram a vencer a 2ª Guerra Mundial**, 1.ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.
17. **Enriquecimento.** Disponível em <http://www.inb.gov.br/pt-br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Enriquecimento>, acessado em: 20/07/2017.
18. **Uranium Hexafluoride - UF₆.** Disponível em <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/uf6/uf6j.htm>, acessado em: 20/07/2017.

19. BETTI, M. Civil use of depleted uranium, **Journal of Environmental Radioactivity**, Karlsruhe, v. 64, p. 113-119, 2003.
20. **Depleted Uranium Inventories**. Disponível em <http://www.wise-uranium.org/eddat.html>, acessado em: 19/07/2017.
21. OLIVEIRA, M. F.; A polêmica sobre o urânio empobrecido. **Ceticismo, Ciência e Tecnologia**. Disponível em <https://ceticismo.wordpress.com/ciencia-tecnologia/a-polemica-sobre-o-uranio-empobrecido/>, acessado em: 19/08/2017.
22. **Plane crashed after maintenance blunder**. Disponível em http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/3093849.stm, acessado em: 19/08/2017.
23. **The mad world of Formula 1 ballast**. Disponível em <http://www.grandprix.com/ns/ns02353.html>, acessado em: 19/08/2017.
24. HAMBLING, D.; Why deadly depleted uranium is the tank buster's weapon of choice. **The Guardian**, 18 mai. 2000. World News. Disponível em <https://www.theguardian.com/world/2000/may/18/armstrade.kosovo>, acessado em: 09/04/2017.
25. ANDREWS, W. D.; OUGH, E. A.; LEWIS, B. J.; BENNETT, L. G. I.; Depleted Uranium on the Battlefield Part 2 – Biological Considerations. **Canadian Military Journal**, Summer 2003. Research and Development.
26. EDWARD, R.; US fired depleted uranium at civilian areas in 2003 Iraq war, report finds. **The Guardian**, 19 jun. 2014. World News. Disponível em <https://www.theguardian.com/world/2014/jun/19/us-depleted-uranium-weapons-civilian-areas-iraq>, acessado em: 23/08/2017.
27. **US broke its own rules firing depleted uranium in Iraq**. Disponível em <http://www.bandepleteduranium.org/en/us-broke-own-rules-firing-depleted-uranium-in-iraq>, acessado em: 22/08/2017.

28. United Nation Environment Programme; **Depleted Uranium in Kosovo: Post-Conflict Environmental Assessment**, Switzerland: United Nation Environment Programme, 2001.
29. WISE, S. S.; THOMPSON, W. D.; MASON, M. D.; Particulate Depleted Uranium Is Cytotoxic and Clastogenic to Human Lung Cells, **Chem. Res. Toxicol**, Orono, v. 20, n. 5, p. 815-820, 2007.
30. XIE, H.; LACERTE, C.; THOMPSON, W. D.; WISE, J. P.; Depleted Uranium Induces Neoplastic Transformation in Human Lung Epithelial Cells, **Chem. Res. Toxicol**, Portland, v. 23, n. 2, p. 373-378, 2010.
31. EDDY, M.; Alemanha dá passo rumo a sistema livre de energia nuclear. **O Globo**, 28 jul. 2015. Mundo. Disponível em <https://oglobo.globo.com/mundo/alemanha-da-passo-rumo-sistema-livre-de-energia-nuclear-16858634>, acessado em: 24/09/2017.
32. Lixo nuclear de extinta mina de urânio ocupa area de cem Maracanãs. **Jornal Nacional**, 16 set. 2017. Disponível em <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2017/09/lixo-nuclear-de-extinta-mina-de-uranio-ocupa-area-de-cem-maracanas.html>, acessado em: 18/09/2017.

ANEXO A – O urânio no Brasil nos últimos anos

A.1

| **Economia** |

Terça-feira 21.6.2016

Pela primeira vez, Brasil vai exportar urânio enriquecido

Argentina será destino do material. Acordo aguarda aval de ministério

RAMONA ORDOÑEZ
ramona@oglobo.com.br

O Brasil vai fazer sua primeira exportação de urânio enriquecido, para reator nuclear, e o destino será a Argentina. Foi o que informou ontem o presidente das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), João Carlos Tupinambá, durante evento na Sociedade Nuclear Americana (NSA), no Rio.

De acordo com o executivo, foi fechado acordo para a exportação de quatro toneladas de urânio enriquecido na forma de pó de UO_2 (dióxido de urânio).

Do total, 1.430 quilos foram enriquecidos a 1,9%; 670 quilos, a 2,6%; e dois mil quilos, a 3,1%. Segundo Tupinambá, a INB já tinha em estoque cerca da metade do volume que será exportado, e o restante foi enriquecido na fábrica de Resende, no Sul Fluminense.

— Todo o processo foi genuinamente brasileiro — destacou o presidente do INB.

ETAPAS REALIZADAS NO PAÍS
O executivo informou que o contrato foi assinado há 15 dias com a Conuar — empresa estatal da Argentina que cuida da parte de combustíveis nucleares — e que agora está aguardando a autorização do Ministério das Relações Exteriores para sua efetivação. O produto será destinado a um reator de pequeno porte para testes, chamado Carem.

Tupinambá explicou, ainda, que as unidades de enriquecimento instaladas na INB (seis cascatas) permitem a produção de cerca de 40% das necessidades da usina nuclear de Angra 1. Se o projeto for concluído com a construção de mais três cascatas, o país passaria a ter condições de atender a toda a demanda por combustível enriquecido da usina e a cerca de 20% da necessidade de Angra 2.

Todas as etapas do enriquecimento de urânio já são realizadas no Brasil, com exceção da conversão no gás chamado de UF_6 . Apesar de o país já ter dominado essa tecnologia, o processo ainda não é feito aqui por questões de escala.

— Estamos buscando uma parceria mais efetiva com a Argentina. Estamos em negociações para a recarga desse reator do Carem e também verificando possibilidades para fornecimento para a usina nuclear de Atucha 1 — acrescentou o executivo.

Tupinambá explicou também que o objetivo, com essa exportação, é aumentar a atuação da INB no mercado e buscar o desenvolvimento da companhia.

Falta definir com o governo federal a continuidade da

“Em momento algum nossas ações colocam em risco o fornecimento nacional. Estamos otimizando nossas operações”

João Carlos Tupinambá
Presidente da INB

construção das quatro últimas cascatas do processo de enriquecimento, que exigirá investimentos adicionais da ordem de R\$ 100 milhões.

O presidente da INB garantiu que a primeira exportação brasileira de urânio enriquecido não vai afetar o fornecimento de cargas para as usinas de Angra 1 e Angra 2. Ele esclareceu que os dois primeiros lotes a serem enviados são de material em estoque, que estava disponível, e que o terceiro lote já foi enriquecido.

— Em momento algum nos-

as ações colocam em risco o fornecimento nacional. Estamos otimizando nossas operações — destacou Tupinambá.

Como o carregamento vai ser feito por rodovia até Uruguaiana e precisa ser escoltado pela Polícia Rodoviária, a expectativa é conseguir enviar o produto até o fim deste mês. Caso não seja possível, segundo o presidente da INB, o carregamento só será feito após as Olimpíadas.

SEGUNDA MINA
Apesar dos recursos escassos, a INB continua executando o projeto da segunda mina de exploração de urânio em Caitité, na Bahia. O executivo disse que espera conseguir produzir cerca de 60 toneladas na nova mina ainda este ano.

A mina na Bahia deverá produzir 250 toneladas anuais de urânio. A INB está investindo R\$ 32 milhões no projeto, mas ainda faltam R\$ 150 milhões para concluí-lo, dos quais R\$ 100 milhões viriam do governo federal. Para este ano, a INB deverá contar com orçamento total da ordem de R\$ 800 milhões — ainda que o necessário fosse R\$ 1 bilhão.

O executivo participou na manhã de ontem da abertura do simpósio anual da Seção Latino-Americana da Sociedade Nuclear Americana (LAS/ANS). ●

Matéria do Jornal O Globo publicada em 21/06/2016.

A.2

Domingo 4.12.2016 Economia | o GLOBO | 39

Dono da sexta maior reserva no mundo, Brasil importa urânio

Novas minas dependem de licenciamento ambiental. Paralisação de Angra 3 atrasa expansão de fábrica



Fase final. O urânio enriquecido é armazenado em pastilhas dentro de varetas de até quatro metros de altura



Enriquecimento. Cilindros fazem parte do processo de reconversão do urânio, antes de ir para a usina nuclear

BRUNO ROSA*
bruno.rosa@oglobo.com.br
RAMONA ORODNEZ
ramona@oglobo.com.br

RESENDE (RJ) E RIO. O programa nuclear brasileiro, que ganhou forma no fim dos anos 1960 com a construção da usina de Angra 1, vive nova polêmica, com a paralisação de sua única mina no sudoeste da Bahia, responsável pela exploração de todo o urânio consumido no país. A produção, que era de 400 toneladas anuais, se esgotou há dois anos. E, afetado pela crise política e econômica, o Brasil, embora dono da sexta maior reserva do mineral no mundo, segundo a estatal Indústrias Nucleares do Brasil (INB), vem importando tudo o que consome de países como EUA, Alemanha, Holanda e Reino Unido.

O urânio é matéria-prima para a geração da energia nuclear. Outros países com grandes reservas são Austrália, Canadá e Rússia. No Brasil, a exploração desse mineral ocorre na mina de Caetité, na Bahia, a mais de 600 quilômetros de Salvador. O urânio, então, passa por um processo químico, gerando um pó amarelo (chamado de *yellow cake*), que posteriormente é enriquecido para gerar energia elétrica nas usinas nucleares.

Responsável pela exploração e enriquecimento do urânio, a INB tenta buscar recursos para voltar a explorar a mineração em novas minas na região de Caetité, o que depende de licenciamento ambiental. A mina a céu aberto tem potencial para produzir 240 toneladas de concentrado de urânio por ano.

A outra mina, subterrânea, pode produzir 400 toneladas anuais. Além disso, segundo a INB, haverá ampliação da unidade química, responsável por transformar o urânio em *yellow cake*, que já está em fase de projeto executivo. Ao todo, serão investimentos totais de R\$ 531 milhões.

Apesar de a INB não divulgar a quantidade de importação de urânio, dados da consultoria Barral M Jorge indicam que, em 2015, foram importados 168,1 toneladas de urânio natural (e seus compostos), bem maior que as 6,8 toneladas compradas do exterior em 2014. Neste ano, até outubro, foram adquiridas 33,8 toneladas.

— Nossa mina na Bahia, que produz anualmente cerca de 400 toneladas por ano de concentrado de urânio, está parada há cerca de dois anos, já que houve esgotamento da mina. Tínhamos um estoque. Um dos focos da INB é retomar a capacidade de produção na Bahia — disse Giovanni Moreira, diretor de Produção Nuclear.

Mas os desafios da INB vão além do licenciamento. Falta dinheiro, dizem fontes do setor. Por isso, o presidente da INB, João Carlos Derzi Tupinambá, eleito para o cargo no início deste ano, está na China em busca de recursos: — A INB está em busca de parcerias.

Outro foco para aumentar a produção do combustível nuclear no Brasil é incentivar o avanço do enriquecimento de urânio no país, feito na fábrica da INB em Resende, no sul do Estado do Rio. Segundo Ezio Ribeiro, superintendente da estatal, o país enriquece somente 16% do que é consumido. Para reverter esse cenário, a estatal pretende investir US\$ 510 milhões, mas depende do Tesouro Nacional.

— A primeira fase do projeto para elevar o enriquecimento já começou, com novas centrífugas. O importante é ter autonomia e ser autossuficiente — disse Ribeiro.

Para superar esse imbróglio, especialistas afirmam que o Brasil precisa de uma política industrial para o setor nuclear. Para o consultor técnico da Associação Brasileira de Energia Nuclear (Aben), Francisco Rondinelli, a importação ocorre devido à falta de investimentos em sua expansão, apesar de o Brasil dominar a tecnologia.

— O Brasil domina a tecnologia de todas as etapas do ciclo do combustível, inclusive a mais estratégica, que é a do enriquecimento. É preciso definir uma política para o ciclo, que poderia contar com recursos do BNDES, para tornar o Brasil exportador de urânio enriquecido — destacou Rondinelli.

Mas os planos da INB esbarram ainda na construção da usina nuclear de Angra 3, que teve suas obras paralisadas em 2015 após denúncias de superfaturamento. É com Angra 3 que a INB pretendia ampliar a fábrica de Resende.

A construção de Angra 3 se arrasta desde 1986. Em Resende, parte do equipamento de Angra 3 já está pronto. Em um local chamado de "acougue", devido à semelhança com a disposição de produtos em um frigorífico, estão estocados 69 equipamentos (chamados de elemento combustível), que têm em seu interior varetas de quase quatro metros de altura com as pastilhas de urânio enriquecido. Só vão sair dali quando Angra 3 estiver pronta, após 2021, segundo previsões.

— Contamos com Angra 3. Esperamos uma solução desse problema a curto prazo. Sabemos que a Eletronuclear está se mexendo bastante na busca de uma solução — disse Tupinambá.

Antônio Müller, presidente da Associação Brasileira para o Desenvolvimento das Atividades Nucleares (Abdan), defende que o país deveria investir para ter capacidade industrial de produção em todas as etapas do combustível nuclear: — É um desperdício ter os insumos, tecnologia e instalações e estamos importando o concentrado de urânio. Poderia se fazer parceria com o setor privado para minerar o urânio, por exemplo. E o país poderia até exportar esse produto. ■

* O repórter viajou a convite da INB

Matéria do Jornal O Globo publicada em 04/12/2016.

Segunda-feira 12/5/2014

País

RISCO EM ANGRA

o GLOBO 3



No limite. Funcionário da Eletronuclear observa depósito 28, que está já plenamente ocupado em 2013. Usinas nucleares em Angra dos Reis estão sob risco de serem desligadas por falta de locais próprios para armazenamento de lixo radioativo

VINÍCIUS SASSANE
vinicius.jorge@folha.globo.com.br

ANULAÇÃO A usina nuclear Angra 2, em Angra dos Reis, corre o risco de ser desligada em 2017 em razão do esgotamento dos depósitos de rejeitos radioativos, segundo uma avaliação da própria Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen) — responsável por fiscalizar o setor — enviada ao Tribunal de Contas da União (TCU). O mesmo deve ocorrer com a usina Angra 1 em 2018 ou 2019. E Angra 3, um empreendimento ainda em construção, pode deixar de entrar em operação por conta da crítica situação de armazenamento dos rejeitos.

Uma auditoria do TCU no sistema que gerencia o lixo radioativo descobriu o tratamento esgotamento dos depósitos de resíduos de baixa e média radioatividade e das piscinas que recebem o combustível usado, de alta radioatividade, decorente da geração de energia. O maior grave é que a construção do novo depósito e da nova piscina está praticamente na mesma terra, um prêmio da parábola forçada do sistema.

O porte-fino dos auditores transcorreu sob sigilo, prática comum quando se trata de assuntos relacionados à política nuclear e aos órgãos federais envolvidos, a Cnen e a Eletronuclear. No último dia 30, quando a auditoria foi submetida à análise em plenário, o ministro relator, André Luis de Carvalho, determinou o sigilo, o que levou à manifestação do processo da sessão secreta para a abertura. O relatório foi aprovado, com a delimitação de um prazo de 90 dias para que os órgãos responsáveis deixem as providências.

A situação mais crítica é a das piscinas para o destino final do combustível nuclear irradiado nas usinas. A de Angra 2 se esgota em 2018 e a de Angra 1, em 2020. A Eletronuclear precisaria construir uma unidade de armazenamento complementar, o que ainda não teve início, como concluiu o TCU. "Caso a unidade não esteja licenciada e construída até 2018, provavelmente a geração elétrica das usinas estará comprometida, uma vez que não poderão operar sem que exista a possibilidade de armazenamento de seus combustíveis irradiados", afirmam os auditores.

Os mesmos auditores reproduzem uma tabela com a taxa de ocupação dos depósitos que abrigam rejeitos de baixa e mé-

Lixo radioativo ameaça parar usinas nucleares

Alerta é do TCU, que identificou esgotamento dos depósitos para rejeitos e combustível em Angra

“Possivelmente, a geração elétrica das usinas estará comprometida, uma vez que não poderão operar sem que exista a possibilidade de armazenamento de seus combustíveis”

Relatório do TCU
Sobre auditoria nas usinas nucleares de Angra dos Reis

dia radioatividade. Um deles está totalmente ocupado neste ano. A área de caixas não tem mais espaço em 2015. E, em 2018, um depósito com 23 mil garrafas de lixo radioativo atingirá a capacidade máxima. Em média, os depósitos conseguem abrigar os rejeitos até 2020. Depois disso, a Cnen e a Eletronuclear precisarão efetuar uma solução. Os materiais de baixa radioatividade são papéis, plásticos, roupas e ferramentas usados nas usinas. Os de média, lítio e resinas.

A informação sobre um tipo de material colocado no depósito anterior de Angra 2 dispensa preocupação com técnicos que conduzem o pente-fino. A Coordenação de Rejeitos e de Transporte de Materiais Radioativos e Nucleares (Corm) da Cnen apontou a existência no espaço de 700 embalagens de alto nível de radiação, representando 17,39% do total. A Eletronuclear, estatal responsável pelas usinas, chegou a afirmar que, na verdade, "existem 582 embalagens de alto nível de radiação no CCR (Centro de Gerenciamento de Rejeitos)". Depois, no curso da auditoria, a Cnen sustentou não existir esse tipo de

material nas dependências das usinas.

O assunto é tão controverso que, em resposta aos questionamentos do GLOBO, a Cnen disse ter havido um "equívoco de classificação nos dados repassados ao TCU". "Buscaremos esclarecer junto ao tribunal. A Cnen tem conhecimento de todos os rejeitos radioativos estocados nas usinas nucleares e afirma que não há rejeitos de alto nível de radiação no local", citou o órgão. A Eletronuclear também negou a existência de "embalagens de rejeitos de alto nível de radiação". "Todos os embalados nos depósitos são de baixa e média atividade".

Um dos motivos para o TCU decidir fazer a auditoria, além dos riscos existentes numa área tão sensível, foi o valor do dinheiro público a ser gasto com os rejeitos radioativos: mais de R\$ 1 bilhão. O transporte e o armazenamento dos resíduos a serem transferidos custarão R\$ 256 milhões. A nova piscina está sendo em R\$ 577 milhões. E o depósito, a ser construído numa cidade brasileira que se dispunha a abrigar o lixo, consumirá mais R\$ 261 milhões.

O Relatório de Rejeitos de Baixa e Médio Nível deverá atingir 45% do cronogra-

ma físico das obras em 2015, conforme meta da Cnen, o que não se concretizará. Até agora, não se escolheu nem a cidade que abrigará os rejeitos, nem a cidade que abrigará os rejeitos. Quatro fatores são considerados críticos pelo TCU para a construção do depósito: a escolha do local, o licenciamento ambiental e nuclear; a construção de torres e a destinação de rejeitos ao Orçamento da União.

FALTAM DEPÓSITOS INTERMEDIÁRIOS

A criação do governo federal foi para a Cnen selecionar o termo de propriedade da União. Uma área chegou a ser escolhida, mas o termo de cessão não foi assinado, conforme a auditoria do TCU. "O processo de seleção do local é bastante complexo e sensível à aceitação pública", cita o relatório. A Cnen, em razão da reação esperada por parte dos moradores das cidades previamente escolhidas, mantém o mistério sobre a futura sede do depósito.

Em 2012, a 1ª Vara Federal de Angra determinou que a União iniciasse no empreendimento recursos para a construção do novo depósito. A Cnen, conforme a mesma sentença, deveria apresentar o local do depósito em um ano. O órgão recebeu o local e decidiu, e os efeitos da sentença estão suspensos. Uma das condicionantes para a concessão da licença ambiental a Angra 3 estabelece a necessidade de se resolver o problema dos rejeitos de Angra 1 e 2. Por isso, os auditores do TCU entendem que a usina pode ter o início do funcionamento adiado por conta do acúmulo de resíduos.

A auditoria constatou ainda que nenhum dos depósitos intermediários de rejeitos radioativos no Brasil está "devidamente licenciado". Não há como garantir que estejam cumpridos os requisitos e padrões de segurança recomendados pela AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica), diz André de Carvalho. Municípios que abrigam rejeitos, como Angra e Rio, não estão recebendo as compensações financeiras, o que só estaria ocorrendo com Alameda de Goiás, destino do lixo radioativo resultante do acidente com o rétor 117 em Goiânia, em 1987. Diante da falta de estratégias expressas em lei ou norma sobre o gerenciamento de rejeitos, o TCU determinou que se adotem providências para a implementação de um projeto sobre licenciamento de depósitos. ■

Eletronuclear diz que 'rearranjos' vão prorrogar sistema de armazenamento

Empresa prevê que nova piscina para combustível estará pronta em 2018

ANULAÇÃO Responsável pelas usinas nucleares brasileiras, a Eletronuclear afirmou nesta terça-feira que o sistema de armazenamento de combustível irradiado está em pleno desenvolvimento, com projeto detalhado, orçamento aprovado. Os projetos de licenciamento ambiental e nuclear, bem como o projeto básico e o processo de contratação, da construção, montagem e comissionamento, estão em andamento. "De acordo

com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen) interna, que pode determinar o desligamento das usinas "em qualquer contexto no qual se verificar que não há condições de segurança adequadas para o armazenamento". A construção do novo depósito de combustível usado, a cargo da Eletronuclear, está dentro do procedimento normal de licenciamento, segundo o órgão.

O depósito de rejeitos, por sua vez, está a cargo da Cnen, responsável pela guarda definitiva dos resíduos. "Há mais de cinco anos estão sendo realizados estudos em diversos locais para selecionar o mais adequado do ponto de vista técnico. Após esta seleção inicial, serão realizadas sondagens junto às populações próximas e às devidas consultas públicas", informa a comissão por meio da assessoria de imprensa. A escolha do local ainda não ocorreu. "Após as etapas técnicas, aspectos sociais e

políticos podem ser determinantes no resultado final". A Cnen também sustentou que não há impedimentos para a operação de Angra 3 do ponto de vista da licença nuclear. Todos os depósitos de rejeitos estão em processo de licenciamento, conforme um cronograma que será apresentado ao Tribunal de Contas da União (TCU). "Os depósitos operam segundo padrões internacionais de segurança e são periodicamente fiscalizados". ■