

UNIVERSIDADE DO SAGRADO CORAÇÃO

ANDRÉ FRANCISCO FALASCA

**PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE URÂNIO E APLICAÇÕES
TECNOLÓGICAS DA ENERGIA NUCLEAR**

BAURU

2016

ANDRÉ FRANCISCO FALASCA

**PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE URÂNIO E APLICAÇÕES
TECNOLÓGICAS DA ENERGIA NUCLEAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro de Ciências Exatas e Sociais
Aplicadas da Universidade do Sagrado
Coração como parte dos requisitos para a
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Química, sob orientação do Prof. Dr. Herbert
Duchatsch Johansen

BAURU

2016

Falasca, Andre Francisco

F177p

Processos de obtenção de urânio e aplicações tecnológicas da energia nuclear / Andre Francisco Falasca.-- 2016.

67 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade do Sagrado Coração - Bauru – SP.

1. Energia elétrica. 2. Química nuclear. 3. Radioisótopos. 4. Resíduos nucleares. I. Johansen, Herbert Duchatsch. II. Título.

ANDRÉ FRANCISCO FALASCA

**PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE URÂNIO E APLICAÇÕES
TECNOLÓGICAS DA ENERGIA NUCLEAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas da Universidade do Sagrado Coração, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Química sob orientação do Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen
Universidade do Sagrado Coração

Prof. Dr. Marcelo Telascrêa
Universidade do Sagrado Coração

Prof.^a Esp. Raquel Teixeira Campos
Universidade do Sagrado Coração

Bauru, 07 de dezembro de 2016.

*Aos meus pais, Odair e Shirley, a toda
minha família e aos que acompanharam
minha jornada para que este sonho fosse
concretizado, dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por tudo que Ele fez e continua fazendo por mim, pela proteção e carinho nos momentos difíceis e pela infinidade de momentos maravilhosos que vivenciei até hoje.

Agradeço de coração, à Universidade do Sagrado Coração, pelo carinho e atenção durante minha graduação.

Agradeço aos meus pais, Odair e Shirley, como também toda minha família, que sempre me apoiou e deu forças para que eu possa ser uma pessoa melhor, me incentivou a conquistar meus sonhos e me orientou nas dificuldades encontradas no caminho.

Agradeço a toda minha turma, com quem pude compartilhar momentos de alegria, como também momentos difíceis que juntos foram superados, onde a união nos proporcionou momentos incríveis dentro desta Universidade.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen, pelas correções, pela atenção, dedicação e pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço a nossa coordenadora, Profa. Esp. Raquel Teixeira Campos, por dedicar sua atenção aos alunos, por todo conhecimento compartilhado e por ser um exemplo profissional para nós formandos.

“[...] muita coisa pode ser lembrada e aprendida ao se olhar para trás, mas somente para uma visita, não para uma estada demorada”

Willian P. Young, 2007

RESUMO

Ao ser descoberta, a radioatividade alavancou várias aplicações que vem ganhando espaço atualmente. A produção de energia elétrica através da fissão atômica pode ser considerada umas das fontes mais limpas devido a sua capacidade de não emitir os gases do efeito estufa e não gerar subprodutos da combustão, pois não depende da queima para a produção de energia. Existem várias etapas que o urânio precisa passar antes de ser transformado em combustível que alimentará os reatores, são elas a exploração e mineração, conversão e beneficiamento, enriquecimento e reconversão na forma de pó, a formação das pastilhas e a montagem do elemento combustível, que irá compor os reatores podendo ser usados na formação de radioisótopos e protótipos, como também na produção de energia elétrica. Os resíduos gerados podem ser tratados e descartados na natureza com uma série de inspeções que verificam os níveis de radioatividade daquele material destinados corretamente de acordo com a sua classificação, sendo de extrema importância prezar pela segurança, pois os acidentes de uma usina nuclear podem ser catastróficos. Apesar de estar envolta em preconceitos diante dos acidentes ocorridos, as aplicações tecnológicas da química nuclear vêm se destacando com o uso de isótopos radioativos não só na produção de energia elétrica, mas também em várias áreas como a medicina nuclear, na agricultura, na produção de radiofármacos, entre outros, o que torna uma área bastante interessante de ser explorada e melhorada.

Palavras-chave: Energia elétrica. Química nuclear. Radioisótopos. Resíduos nucleares.

ABSTRACT

Upon its discovery, radioactivity has leveraged several applications that are gaining attention nowadays. The production of electrical energy through atomic fission can be considered one of the cleanest sources due to its ability not to emit greenhouse gases and not to generate by-products of combustion, since it does not depend on the burning for the energy production. There are several steps that uranium must pass before being transformed into fuel that will feed the reactors: exploration and mining, conversion and processing, enrichment and reconversion in the form of powder, formation of pellets and assembly of the fuel element, which fill the nuclear reactor and can be used in the formation of radioisotopes and prototypes, as well in the production of electrical energy. The waste generated can be treated and discarded in nature with a series of inspections that verify the levels of radioactivity of that material properly destined according to its classification, being of extreme importance to be safe because the accidents of a nuclear power plant can be catastrophic. Despite being biased in the face of accidents, the technological applications of nuclear chemistry have been highlighted by the use of radioactive isotopes not only in the production of electricity, but also in several areas such as nuclear medicine, agriculture, Radiopharmaceuticals, among others, which makes it an interesting area to be explored and improved.

Keywords: Electrical energy. Nuclear chemistry. Radioisotopes. Nuclear waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Marie e Pierre Curie	19
Figura 2- Pintura do primeiro reator nuclear em 1942	21
Figura 3 - Decaimento da série do urânio.....	24
Figura 4 - Fissão do urânio.....	25
Figura 5 - Reação em cadeia do urânio	26
Figura 6 - Elemento urânio	27
Figura 7- Reservas mundiais de urânio.....	28
Figura 8 - Reserva Nacional de urânio.....	29
Figura 9 - Processamento: Ciclo Fechado	30
Figura 10 - Processamento: Ciclo Aberto.....	31
Figura 11 - Propriedades do UF ₆	33
Figura 12 - Processo de difusão gasosa no enriquecimento do urânio.....	35
Figura 13 - Processo de ultracentrífuga	36
Figura 14 - Modelo de Cascatas	37
Figura 15 - Processo de reconversão do UF ₆	40
Figura 16 - Produção das pastilhas	42
Figura 17 - Funcionamento de uma Usina Nuclear	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Urânio e seus isótopos.....	27
Tabela 2 – Características dos reatores de potência.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGR – Advanced Gas-cooled Reactor
AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica
BWR – Boiling Water Reactor
CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
DUA – Diuranato de Amônio
EUA – Estados Unidos da América
GCR – Gas-Cooled Reactor
HEU – High Enriched Uranium
HTGR – High Temperature Gas Reactor
IDR – Integrated Dry Route
IEA – International Energy Atomic
INB – Indústrias Nucleares do Brasil
IPEN – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares
LEU – Low Enriched Uranium
LIS – Lixiviação *in situ*
LWR – Light Water Reactor
PHWR – Pressurized Heavy Water Reactor
PWR – Pressurized Water Reactor
RBMK – Reactor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy
SGHWR – Steam-Generating Heavy Water Reactor
TCAU – Tricarbonato de Amônio Uranilo
USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	METODOLOGIA	16
5	BASES DA QUÍMICA NUCLEAR	17
5.1	INÍCIO DA ERA NUCLEAR	17
5.2	ÁTOMOS E CARACTERÍSTICAS RADIOATIVAS.....	21
5.3	URÂNIO COMO COMBUSTÍVEL	26
5.4	ETAPAS DE EXPLORAÇÃO DO MINÉRIO	28
5.5	CONVERSÃO DO URÂNIO	32
5.6	ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO	33
5.7	RECONVERSÃO.....	38
5.8	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DAS PASTILHAS.....	41
5.9	REACTORES E ENERGIA ELÉTRICA.....	43
6	APLICAÇÕES DA QUÍMICA NUCLEAR	48
6.1	MEDICINA NUCLEAR.....	48
6.2	RADIAÇÃO NA AGRICULTURA.....	49
6.3	RADIAÇÃO NA INDÚSTRIA.....	50
7	RESÍDUOS NUCLEARES	52
7.1	CONFINAMENTO DOS REJEITOS DENTRO DA TERRA.....	54
7.1.1	Fundos oceânicos	55
7.1.2	Camadas de gelo polar.....	55
7.1.3	Depósitos no solo.....	55
7.1.4	Deposição em formações geológicas profundas.....	55
7.2	ELIMINAÇÃO DOS REJEITOS DA BIOSFERA	56
8	ACIDENTES NUCLEARES	57
8.1	ACIDENTE NUCLEAR DE CHERNOBYL.....	57
8.2	ACIDENTE NUCLEAR DE THREE MILE ISLAND.....	59
8.3	ACIDENTE NUCLEAR DE FUKUSHIMA	59
8.4	ACIDENTE NUCLEAR COM CÉSIO-137	60
8.5	BOMBA ATÔMICA	61
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERENCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Todas as tecnologias que são consideradas avançadas, com suas infinitas aplicações, podem ser consideradas benéficas ou malélicas, pacíficas ou bélicas, dependendo da aplicação a que se destina. O mesmo ocorre com a nanotecnologia, biologia, engenharia, eletrônica, como também com a produção de energia em suas diversas formas. A mudança na tecnologia mundial de energia elétrica traz opções de produção de energia muito mais viáveis a serem estudadas e desenvolvidas, como a energia nuclear, que é ainda pouco explorada no Brasil. É de conhecimento geral, que a energia nuclear é considerada altamente perigosa no mundo todo pelos fatos que marcaram a história, como as bombas atômicas lançadas sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki, em 1945, durante a Segunda Guerra Mundial, como também os acidentes que ocorreram em diversos países. (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005)

No Brasil, a energia elétrica produzida pelas usinas hidroelétrica (usina que utiliza a força hidráulica na produção de energia elétrica) sempre foi o maior potencial. Ao se estudar toda questão da energia nuclear, o país adotou a ideia de investimento para se prevenir e apenas ter em seu território nacional tal tecnologia, onde David et al. (1981, p13.) cita que ...

[...] A necessidade de energia nuclear como tal, isto é, como produtora de eletricidade não era urgente nem justificável uma vez que o país dispunha de amplos recursos hidroelétricos ainda inexplorados. A introdução de reatores nucleares no país se justificaria apenas como método de adquirir a tecnologia nuclear.

O intuito das aplicações da energia e da química nuclear no Brasil, se dá pelas pesquisas e exploração de novos recursos, pois ao se tomar uma estimativa plausível sobre a demanda de energia elétrica, a energia nuclear só teria um papel importante a partir de 2010, onde a grande busca pelo bagaço da cana e biogás de vinhoto mostra que o uso da energia nuclear só será uma opção a partir da segunda década do Século XXI, não sendo a única nem a melhor opção no momento. (DAVID et al., 1981)

Atualmente, várias das atividades em nosso cotidiano empregam de forma direta ou indireta, como também de modo seguro, inúmeras radiações nucleares. Um exemplo são as técnicas usadas na cura ou prevenção de doenças em milhares

de pessoas, uma delas é o tratamento do câncer (quimioterapia e radioterapia), o que levou vários países pelo mundo a explorar e optar por essa tecnologia. (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005)

Segundo Lovelock (2006) a fissão nuclear é uma forma mais segura da geração de energia, enquanto ainda não temos outras tecnologias viáveis para a produção de energia através da fusão nuclear e outras tecnologias nucleares limpas.

Apesar das vantagens de se produzir energia através da fissão nuclear, contamos com um preocupante incômodo: o resíduo radioativo. O resíduo radioativo apresenta características peculiares, tendo obrigatoriamente que ser tratado e controlado, merecendo assim uma atenção especial, um descarte correto e em local apropriado, para que a radiação não contamine ao seu redor. (HIROMOTO et al., 1999)

Com isso, houve uma grande necessidade de se estudar a química nuclear e a construção de reatores nucleares tanto no Brasil como em vários países. As aplicações nucleares desde sua descoberta, bem como a produção de energia a partir da fissão nuclear vem sendo uma tecnologia de grande avanço mundial pois será bastante requisitada nos próximos anos por ter uma valiosa economia energética, apesar de estar envolta por tabus e preconceitos, como também injustificada mesmo oferecendo valiosos benefícios em inúmeras áreas da Ciência e Tecnologia. (SILVA, 2011)

Como o foco do mundo todo, hoje se volta para o desenvolvimento sustentável e a ecologia, deve ser explorado estes recursos para tecnologias já utilizadas que se valem da química nuclear, mas como utilidades sustentáveis e economicamente viáveis

2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os subcapítulos que descrevem o objetivo geral e objetivos específicos, os quais compõem este Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

Mostrar os avanços da química nuclear e a produção de energia através de fissão nuclear.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Perante a bibliografia, coletar informações para produção de energia através da fissão nuclear com o urânio radioativo.

- Aplicações da química nuclear e possíveis tratamentos e destinações para o subproduto da usina nuclear.

- Citar casos de utilização de isótopos radioativos em outras áreas, tais como na produção de radiofármacos, aplicações na biomedicina, agricultura, biologia, engenharia de alimentos, entre outros.

3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem por propósito, explicar e detalhar a produção de energia através da fissão nuclear nos reatores, mostrar de uma maneira simplificada todo processo, desde a mineração envolvendo também todo beneficiamento do urânio até o final do processo, que tem como função produzir a energia elétrica que está sendo tão demandada atualmente e nos próximos anos, bem como as aplicações da química nuclear, iniciando com a descoberta da radioatividade até os possíveis tratamentos dos rejeitos radioativos e avanços relacionados a esta área.

A química nuclear hoje, vem crescendo a cada descoberta, mostrando que seus avanços e tecnologias fazem parte de quase todo nosso cotidiano, desmistificando o preconceito que existe nesse assunto e que por muito tempo vem sendo injustiçado. Ao decorrer deste Trabalho de Conclusão de Curso, será possível perceber que este tipo de geração de energia provém da fissão dos átomos e oferece mais benefícios à sociedade do que outras formas de energia, sendo bem mais eficientes em alguns aspectos e não emissoras de dióxido de carbono (CO_2), o que é, em princípio, um aspecto muito positivo quando se aborda os assuntos que envolvem a ecologia e a preservação do meio ambiente. Das várias aplicações que podem se usar, a tecnologia nuclear, hoje vem se destacando bastante nas áreas da medicina, indústrias e agricultura.

4 METODOLOGIA

Este trabalho se trata de uma pesquisa qualitativa e tem a importância de mostrar o quão energético e econômico pode se tornar a produção de energia elétrica a partir da fissão do urânio. Para a realização deste trabalho foram feitas buscas por artigos e trabalhos relacionados ao tema, utilizando as palavras-chave pode-se prosseguir com a pesquisa mais a fundo no trabalho

As bases de dados utilizadas foram:

- Google Acadêmico;
- Scielo;
- Nos serviços da biblioteca da USP
- Portal de Periódicos da CAPES
- Livros, teses, dissertações, apostilas e revistas relacionadas ao tema deste trabalho e a abordagem metodológica adotada.

5 BASES DA QUÍMICA NUCLEAR

Os avanços tecnológicos no mundo todo são constantes, o que nos leva a pesquisar novos atributos e contribuir para um planeta mais sustentável, onde fontes mais limpas de produção de energia é um exemplo. Essas fontes mais limpas provêm de elementos naturais, como o urânio (U), e o mais importante nesta etapa é entender e explorar o que este elemento consegue fazer.

5.1 INÍCIO DA ERA NUCLEAR

A descoberta da radioatividade, apesar de ser um assunto pouco explorado, se deu no Século XIX, por volta do ano de 1895, quando o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen, em sua sala escura, estudava a condutividade dos gases. O pesquisador observava que uma placa que cobriu com platinocianeto de bário, composto fluorescente cuja fórmula molecular é $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{Cn})_4]$ se tornava luminescente quando era ligada próximo a um tubo de raios catódicos (ampola de Crookes ou Lenard), embora o tubo estivesse envolto em papel opaco. (MARTINS, 1990)

O cientista também observou que quando expôs a placa sem o revestimento de platinocianeto de bário, a mesma continuava a brilhar. Desconhecendo a origem de sua luminescência, investigou a placa colocando vários objetos entre a placa e a válvula, e surpreso, viu que eles se tornavam transparentes, quando por um descuido colocou sua mão na tela e pôde ver os ossos de sua mão. A partir destas constatações, Röntgen registrou todos os seus experimentos em chapas fotográficas e entregou a Sociedade Físico-Médica de Wurburg um relatório de suas pesquisas, chamando os raios de “raios-X”. (XAVIER et al., 2007)

Por definição, raio-X é uma radiação eletromagnética que tem um comprimento de onda (λ) em um intervalo de $10^{-11} \text{ m} < \lambda < 10^{-8} \text{ m}$ que tem origem através do choque de elétrons produzidos em um cátodo aquecido contra elétrons provenientes do ânodo metálico. Sua descoberta na época foi um marco histórico e uma surpresa para a sociedade científica, pois através do uso de raios-X poderia ver por dentro do corpo humano, sem sequer precisar abri-lo. (CHASSOT, 1995)

Antonie Henri Becquerel, físico, membro de uma família de cientistas, que realizava pesquisas sobre ópticas, fosforescência invisível e alguns espectros da fluorescência, sentiu um grande interesse na descoberta dos raios-X de Röntgen.

Utilizando o urânio nos seus experimentos para aperfeiçoar as pesquisas realizadas e conhecendo os trabalhos de Poincaré (físico e matemático), Henry e Niewenglowski, Becquerel percebe que além de emitir radiações visível e infravermelha, os corpos de urânio podiam também emitir o tal raio-X, com isso Martins (1990, p. 33) cita uma nota onde Becquerel diz que,

[...] com o sulfato duplo de urânio e potássio, de que possuo alguns cristais sob a forma de uma crosta transparente, fina, realizei a seguinte experiência: Envolva-se uma chapa fotográfica de Lumière em duas folhas de papel negro muito expesso, de tal forma que a chapa não se escureça mesmo exposta ao Sol durante um dia. Coloca-se uma placa da substância fosforescente sobre o papel, do lado de fora, e o conjunto é exposto ao Sol durante várias horas. Quando se revela a chapa fotográfica, surge a silhueta da substância fosforescente, que aparece negra no negativo. Se for colocada uma moeda ou uma chapa metálica perfurada, entre a substância fosforescente e o papel, a imagem desses objetos poderá ser vista no negativo. Pode-se concluir dessas experiências que a substância fosforescente em questão emite radiações que penetram um papel opaco à luz e reduzem sais de prata. (BECQUEREL, 1896a) [...]

Com isso, Becquerel chega a conclusão que a radiação penetrante se origina do elemento e não havia relação com a fluorescência. (XAVIER et al., 2007)

Marie Sklodowska Curie, cientista polonesa na época, estudava vários minerais do urânio quando notou um acontecimento que se estendia a todos elementos pesados, não somente ao urânio, descobrindo assim a radioatividade. A radiação até então descoberta por Becquerel, foi chamada de “radioatividade” pela polonesa Marie Curie em 1898 que demonstrou por estudos realizados, que independente do composto que estavam, os átomos eram os responsáveis por emitir radiação. (XAVIER et al., 2007)

Dando continuidade a seu trabalho e junto com seu marido Pierre Curie, como mostra a Figura 1, demonstrou que outros elementos também eram radioativos, como o tório (Th), rádio (Rd) e o polônio (Po). (ATKINS; JONES, 2006; XAVIER et al., 2007)

Os raios de Becquerel na época não se relacionava apenas com os raios do urânio, mas também aos raios tóricos como outras radiações e conforme Martins (1990, p. 40), Marie Curie cita “ [...] chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel, o nome hiperfosforescência, que foi proposto para o fenômeno, parece-me dar uma falsa ideia de sua natureza. ”

Figura 1- Marie e Pierre Curie



Fonte: Silva (2011).

O que chama-se de radioatividade nada mais é que um fenômeno onde alguns núcleos atômicos se desintegram e emitem radiações, se transformando em outros núcleos pois ninguém pensava que os átomos tinham um núcleo. (MARTINS, 2003)

Em 1900, o físico neozelandês Ernest Rutherford e o físico francês Pierre Curie descobriram dois tipos de emissões dos elementos radioativos denominadas partículas alfa (α) e beta (β). Logo após, o físico francês Paul Ulrich Villard identificou uma terceira radiação não afetada pela luz, chamando a de partícula gama (γ). (XAVIER et al., 2007)

Quando Rutherford em seus experimentos passou a radiação entre dois eletrodos carregados, viu que um tipo de radiação envolvia partículas positivas, chamando as de alfa (α). Definiu – se também por experimentos que a radiação que envolvia partículas negativas foi chamada de beta (β). Já a terceira radiação não era afetada pelo campo elétrico e a chamou de radiação gama (γ). (ATKINS; JONES, 2006)

Partículas alfa (${}^4_2\alpha$), que tem carga +2 são constituídas por dois prótons e dois nêutrons, se relacionam a núcleos de Hélio (He) que é um gás nobre que não reage quimicamente com outros elementos. Já as partículas beta (${}_{-1}^0\beta$), com carga -1 são partículas negativas (elétrons) resultantes da conversão de um nêutron em um próton. A radiação gama (${}^0_0\gamma$) tem carga 0, não é afetada pela luz e é emitida

quando o núcleo com excesso de energia tenta se estabilizar, sendo emitida na forma de ondas eletromagnética da mesma natureza da luz. (CARDOSO, 2000)

Sendo assim, Rutherford descobre a existência de um núcleo atômico em 1903 e percebe que quando um núcleo instável se decompõe é que acontece a radioatividade. Este fenômeno, conhecido como Decaimento Radioativo, pode desvendar que ao ocorrer a radiação, os átomos do elemento original se transformavam em novos elementos. (XAVIER et al., 2007)

Na década de 1920, Rutherford (Inglaterra), Harkins (EUA) e Orme (Austrália) propuseram a possível existência de uma partícula sem carga, “nêutron”, resultando numa combinação de um elétron e um próton. Apenas em 1932, James Chadwick, pôde comprovar a existência do nêutron. (XAVIER et al., 2007)

A radioatividade artificial enfim é descoberta, pelo casal Irene Curie e Frédéric Joliot, filha e genro do casal Curie, em 1934. Propuseram um experimento onde bombardearam uma folha de alumínio-27 com as partículas α e presenciaram um novo isótopo radioativo, o fosforo-30. Através deste experimento foi possível explicar que novos radioisótopos que não existiam na natureza podiam ser fabricados. O que possibilitou ao casal em 1935 ganhar o Prêmio Nobel de Química. (XAVIER et al., 2007)

Em 1934, Enrico Fermi, físico italiano concluiu que ao bombardear o núcleo de certos átomos com nêutrons a uma velocidade constante e moderada, fazia-se com que o núcleo destes átomos bombardeados capturassem o nêutron, levando Otto Hahn e Fritz Stassmann, em 1938, a detectarem o bário (Ba) após bombardearem urânio com nêutrons moderados. Esse processo nuclear dividia o urânio provocando um processo de reação em cadeia. Conforme Xavier et al. (2007, p 84) tal fato ficou marcado, onde Lise Meitner, física austríaca da equipe de Hahn, e Otto Robert Frisch explicam que, “[...] o núcleo do átomo de urânio é instável e, ao ser bombardeado com nêutrons moderados, rompe-se praticamente ao meio, originando dois núcleos de massa média e liberando 2 ou 3 nêutrons, além de mais energia”. Esse processo, ficou conhecido como Fissão Nuclear. (XAVIER et al., 2007)

Pode se dizer que a descoberta da fissão nuclear foi o que deu o pontapé inicial para o desenvolvimento das indústrias nucleares. Com a chegada da Segunda Guerra Mundial, Albert Einstein, físico famoso na época, se viu pressionado a escrever uma carta ao presidente do EUA, Franklin Delano Roosevelt. Em 1939 ele relatou na carta as possíveis aplicações militares e seus perigos, o que poderiam

também ser descoberto pelos nazistas, fazendo com que Roosevelt deflagrasse o Projeto Manhattan, uma pesquisa que visava construir uma bomba com base na fissão nuclear. No dia 2 de dezembro de 1942, entrou em operação o primeiro reator nuclear, como mostra a Figura 2 que realizava uma reação em cadeia autossustentável. Era o início da Era Nuclear. Logo em seguida, em 1945, foram lançadas as primeiras bombas nucleares sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki. (BROWN; LEMAY; BURSTEN, 2010)

Figura 2– Pintura do primeiro reator nuclear em 1942



Fonte: Brown, Lemay Junior e Bursten (2010, p. 791)

5.2 ÁTOMOS E CARACTERÍSTICAS RADIOATIVAS

Nos átomos, existe uma força capaz de manter os prótons e os nêutrons unidos no núcleo, o que também é forte o bastante para que a repulsão entre eles seja superada agindo em distâncias pequenas. Para chegar na estabilidade em um átomo precisamos levar em conta que: os nêutrons não têm carga mas contribuem nessa força, como também são necessários para superar a repulsão dessa força em núcleos com número atômico elevado. (ATKINS; JONES, 2006)

O principal parâmetro é o número de prótons de um átomo, pois o número de prótons é quem relaciona a somente um elemento químico. Átomos com o mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons podem ser denominados como isótopos e a combinação desses prótons como também nêutrons, podem ser estáveis ou não. Os de combinação instáveis podem ser chamados de radioisótopos ou isótopos radioativos, que emitem energia eletromagnética para atingir o equilíbrio.

Essa energia é a que chamamos de Radiação Nuclear ou Energia Nuclear, que pode superar 10 keV, energia muito maior com que lidamos normalmente. Para ter uma base, 100g de urânio contém por volta de $2,5 \times 10^{23}$ átomos e a bomba explodida em Hiroshima, tinha apenas 20 kg da matéria-prima. (SILVESTRE et al., 2007)

A definição mais simples do termo Energia Nuclear pode ser simplificada como a energia que mantém os prótons e nêutrons ligados juntos ao núcleo e segundo Cardoso (2010), os prótons se repelem por ter a mesma carga (positiva), e como estão juntos no núcleo, há uma energia de dentro do núcleo dos átomos com mais de uma partícula que mantém esta estrutura estável.

Estudando as emissões radioativas, o cientista Frederick Soddy contribuiu na criação das leis da radioatividade. A primeira lei da radioatividade ou lei de Soddy tem relação com o decaimento alfa e diz “quando um átomo sofre um decaimento alfa seu número atômico diminui duas unidades e o seu número de massa diminui quatro unidades” acontecendo em todo elemento radioativo que emite uma partícula alfa. Na emissão de uma partícula alfa dois prótons são perdidos diminuindo assim o número atômico em duas unidades, já o número de massa é a soma dos prótons com os nêutrons e como a partícula possui dois prótons e dois nêutrons, o número de massa diminui em quatro unidades. (BRASIL ESCOLA, c2016)

A segunda lei da radioatividade se refere ao decaimento beta e diz que “quando um átomo emite uma partícula beta, seu número atômico aumenta uma unidade e seu número de massa permanece o mesmo”. Essa emissão é como um elétron e possui carga -1, aumentando o número atômico e o número de massa permanece constante, pois juntamente com a partícula, é emitida a radiação gama (que não possui carga nem massa) e enquanto o nêutron desintegra-se o próton é formado, substituindo o no núcleo. Formando o próton, o número atômico aumenta uma unidade. (BRASIL ESCOLA, c2016)

Ao falar em energia, pode-se citar um fenômeno chamado Decaimento Radioativo. Decaimento Radioativo se dá quando o núcleo está com excesso de prótons e/ou neutros e se torna instável. É um fenômeno probabilístico e consiste na desintegração de um núcleo em outro núcleo, liberando partículas e/ou radiação gama. Até que o núcleo estável seja formado, o radioisótopo vai passar por várias desintegrações diminuindo assim o número inicial de núcleos radioativos de uma

amostra, definindo-se o tempo de meia vida do mesmo e também produzindo outros elementos, como mostra a Figura 3. (SILVESTRE et al., 2007)

Segundo Brown, Lemay Junior e Bursten (2010) o tempo de meia-vida pode ser explicado como o tempo necessário para que metade da massa inicial decaia, dependendo do elemento podem levar anos ou segundos.

Como podemos observar na Equação 1, o tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) e a constante de decaimento (k) são grandezas inversamente proporcionais, assim pode-se observar que quanto maior for o decaimento, menor será o tempo de meia-vida do elemento. Com isso, nuclídeos com meia-vida curta tendem a ser menos estáveis e mais radioativos do que os nuclídeos com meia-vida longa. (ATKINS; JONES, 2006)

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (1)$$

Alguns isótopos de elementos químicos têm como característica a radioatividade, e em alguns núcleos estáveis o decaimento pode ser induzido através do bombardeio de radiação eletromagnética. Tal elemento químico pode ser encontrado na natureza em uma variedade de isótopos e este pode ou não apresentar características radioativas. (SILVESTRE et al., 2007).

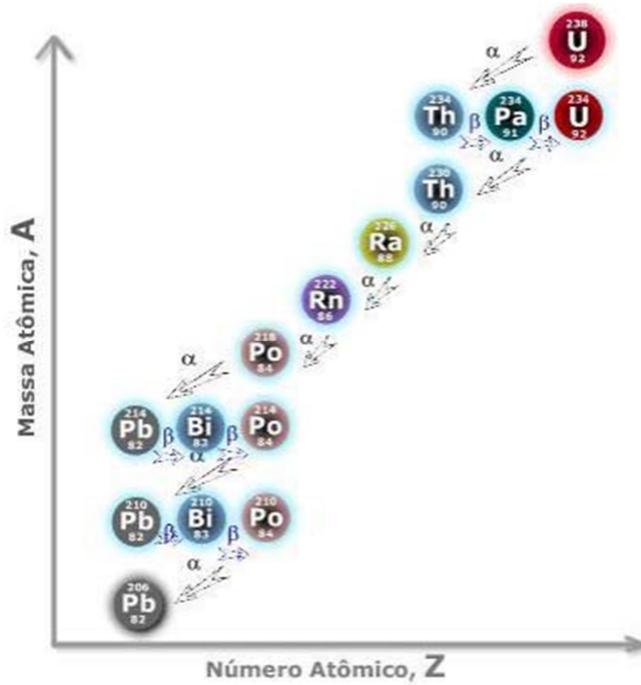
Ao bombardear o núcleo do átomo com nêutrons moderados, tem-se um processo chamado de Fissão Nuclear. No processo de fissão nuclear, o núcleo pode ser dividido em dois outros núcleos de massas comparáveis, o que libera uma quantidade extraordinária de energia, como mostra a Figura 4. O nêutron bombardeado é quem vai oferecer a energia para que o núcleo se fissione. Junto com esses dois núcleos menores e a energia liberada, são emitidos mais dois ou três nêutrons, que podem desencadear a fissão de mais outros núcleos, funcionando como uma reação em cadeia, como mostrado na Figura 5. (SILVESTRE et al., 2007)

Este processo é o mecanismo base de funcionamento dos reatores, que ocorrem de forma controlada e monitorada, como também da bomba atômica, onde as fissões ocorrem em pouco tempo, numa reação em cadeia. (SILVA, 2010)

A descoberta da fissão nuclear foi fruto de uma tentativa de se fazer elementos transurânicos, ou seja, sintetizar elementos químicos com número atômico maior que 92 por meio de reações que ocasionaram o decaimento do núcleo. Segundo

Lima (2004) a fissão do núcleo do urânio-235 pode liberar em média 2,5 nêutrons e irá ocasionar a reação em cadeia nos reatores nucleares que tem uma propriedade importante, a magnitude de energia liberada numa ordem de 200 MeV.

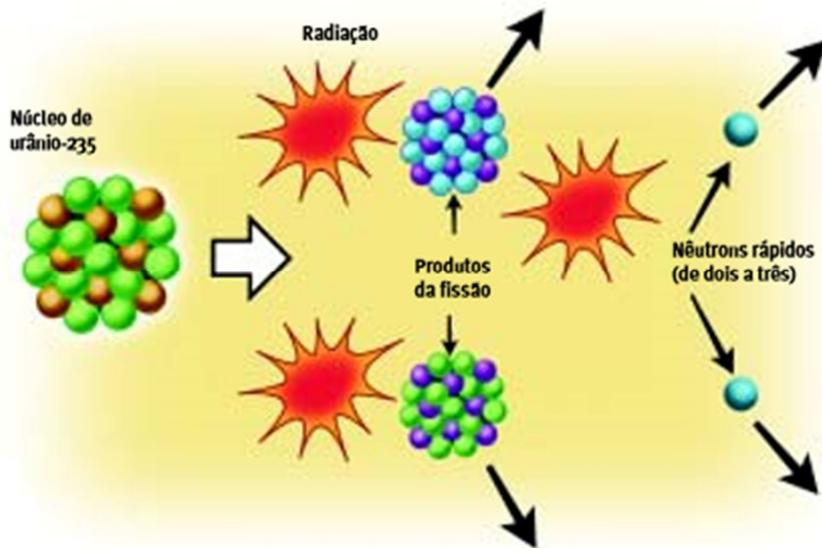
Figura 3 – Decaimento da série do urânio



Fonte: Lima (2008)

Ao contrário da radioatividade, que pode ser manifestada por alguns isótopos na natureza, a fissão nuclear raramente ocorre de forma espontânea, pois precisa ser bombardeada e tornar o núcleo instável. (SILVESTRE et al., 2007)

Figura 4 - Fissão do urânio



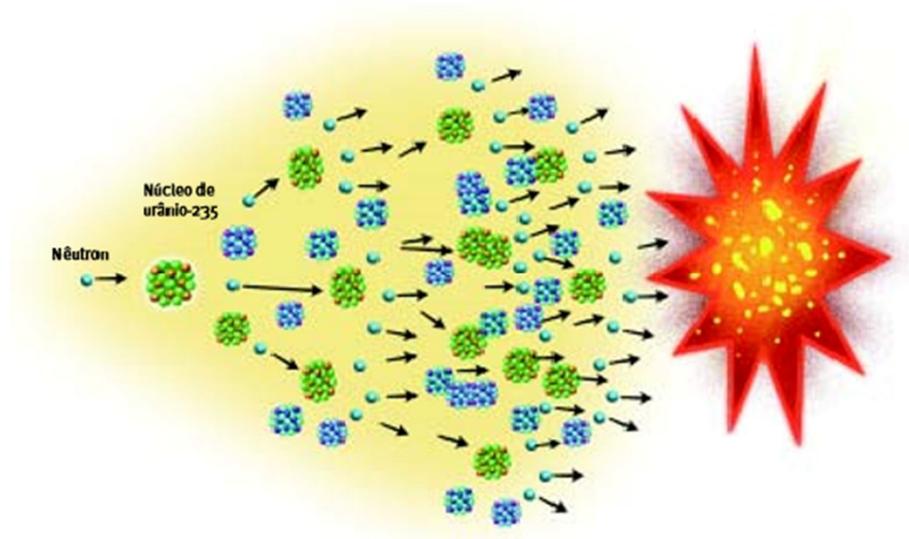
Fonte: Gonçalves e Almeida (2005)

Quando ocorrem as reações nucleares, é liberada muita energia para que os núcleons do núcleo possam ficar estáveis. Einstein, estudando essa técnica através da Teoria da Relatividade, notou que a massa de um objeto é a medida do seu conteúdo de energia, sendo assim a massa e a energia, grandezas proporcionais. Podemos observar pela Equação 2. (ATKINS; JONES, 2006)

$$E = mc^2 \quad (2)$$

Ao observar a Equação 2, percebemos que a perda de energia total (E) pode ser constantemente seguida por uma perda de massa (m), sem descartar a velocidade da luz (c) elevada a segunda potência. A perda de massa nessas reações químicas geralmente passa despercebida e é bem pequena, diferentemente das reações nucleares onde a troca de energia é muito grande, tem-se uma perda de massa mensurável, podendo ser calculada em uma variação da massa entre produtos e reagentes. (ATKINS; JONES, 2006)

Figura 5 - Reação em cadeia do urânio



Fonte: Gonçalves e Almeida (2005)

5.3 URÂNIO COMO COMBUSTÍVEL

Há cerca de 118 elementos na natureza atualmente. Os elementos raramente são iguais e podem ter diferentes quantidades de nêutrons. Já os núcleos com os mesmos números de prótons, diferentes do número de nêutrons são chamados isótopos. Ao falar em isótopos, depara-se com o urânio ($Z = 92$), que pode ser encontrado na natureza em três formas: urânio-235 (^{235}U), o urânio-238 (^{238}U) e o urânio-234 (^{234}U) que por sua vez são isótopos do Urânio. (CARDOSO, 2010)

O urânio é um elemento químico metálico, radioativo e que em temperatura ambiente encontra-se no estado sólido e pertence à família dos actinídeos. Está amplamente distribuído pela crosta terrestre e não tem ao certo uma cor característica, podendo ser amarelo até uma tonalidade próxima ao castanho. Seu principal uso é como combustível para reatores em usina nuclear, sendo quase 16% do total energia produzida por fissão nuclear (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2002). Em toda camada terrestre, o urânio se divide em porcentagens dos seus isótopos, aproximadamente 99,2% do ^{238}U com 146 nêutrons ($t_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ anos), 0,7% do ^{235}U com 143 nêutrons ($t_{1/2} = 7 \times 10^8$ anos) e alguns traços do ^{234}U com 142 nêutrons ($t_{1/2} = 2,4 \times 10^5$ anos), como mostram a Tabela 1 e Figura 6. Para que o

urânio possa ser usado como combustível nuclear, deve ser extraído e transformado em um composto que será beneficiado em uma etapa futura. (LIMA 2008)

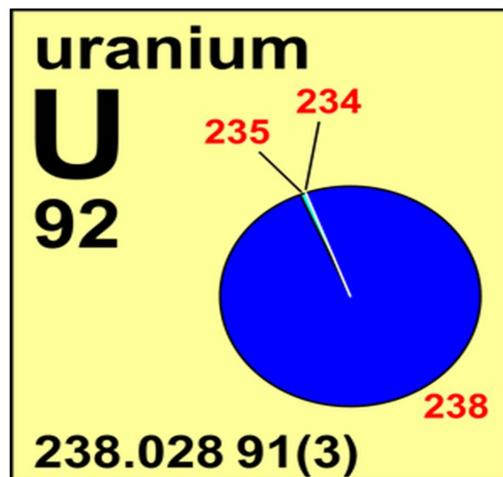
Tabela 1 - Urânio e seus isótopos

Isótopo	Massa Atômica (Da)	Abundância isotópica (quantia da fração)
^{234}U	234,040 95 (2)	0,000 054 (5)
^{235}U	235,043 93 (2)	0,007 204 (6)
^{238}U	238,050 79 (2)	0,992 724 (10)

Fonte: *Comission on isotopic abundances and atomic weights* (c2015)

Nota: adaptado pelo autor.

Figura 6 - Elemento urânio



Fonte: *Comission on isotopic abundances and atomic weights* (c2015)

O urânio-235 é um elemento pouco abundante na natureza que possui 92 prótons, 143 nêutrons e tem massa atômica 235, porém é o mais usado para que ocorra a fissão nuclear por ser fissionado por nêutrons de qualquer energia, os chamados “nêutrons térmicos”. Diferente do urânio-235, o urânio-238, encontrado em maior quantidade na natureza, possui 92 prótons e 146 nêutrons, resultando na massa atômica de 238. A desvantagem do urânio-238 deve-se ao fato de a fissão

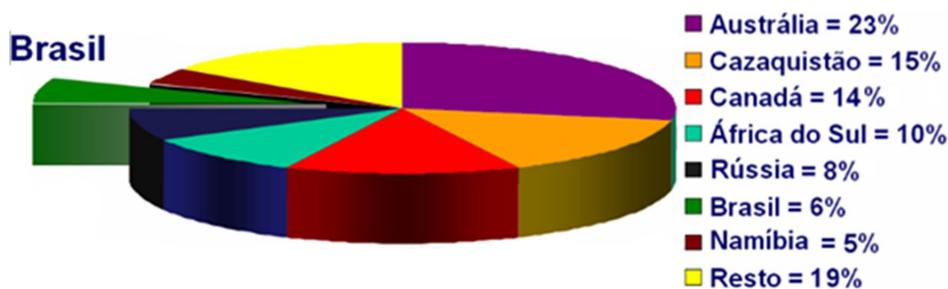
só ocorrer mediante o choque por nêutrons de elevada energia cinética. (CARDOSO, 2010)

5.4 ETAPAS DE EXPLORAÇÃO DO MINÉRIO

O Brasil possui atualmente a sexta maior reserva de urânio do mundo, estimada em 309.200 toneladas, como mostrado na Figura 7.

A Figura 8 apresenta a distribuição no Brasil das reservas e unidades de extração e de beneficiamento. Do total das reservas, 46% estão localizados em Itataia-CE e os 33% entre os municípios de Caetité-BA e Lagoa Real-BA, o restante (21%) está espalhado pelo país. (LIMA, 2008)

Figura 7- Reservas mundiais de urânio



Fonte: Soares e Reis (2012)

No Brasil a única empresa autorizada pelo governo para extrair e processar tanto o urânio como outros materiais radioativos é a INB – Indústrias Nucleares do Brasil que foram criadas através do Decreto-Lei Nº 2.464, de 31 de agosto de 1988. As INB atuam na cadeia produtiva do urânio, desde a exploração, mineração até o fim do processo de fabricação do combustível, responsável pela geração da energia elétrica. (SOARES; REIS, 2012)

Um fato interessante é que a extração do urânio não é a única forma que se obtém o combustível, podendo-se utilizar de fontes secundárias também, como material de artefatos bélicos, reprocessamento do urânio já utilizado, entre outras. A IEA, *International Agency Atomic*, em 2006, relata que o urânio extraído das reservas respondeu por 54% da energia nuclear produzida no mundo todo. (SOARES; REIS, 2012)

Figura 8 - Reserva Nacional de urânio

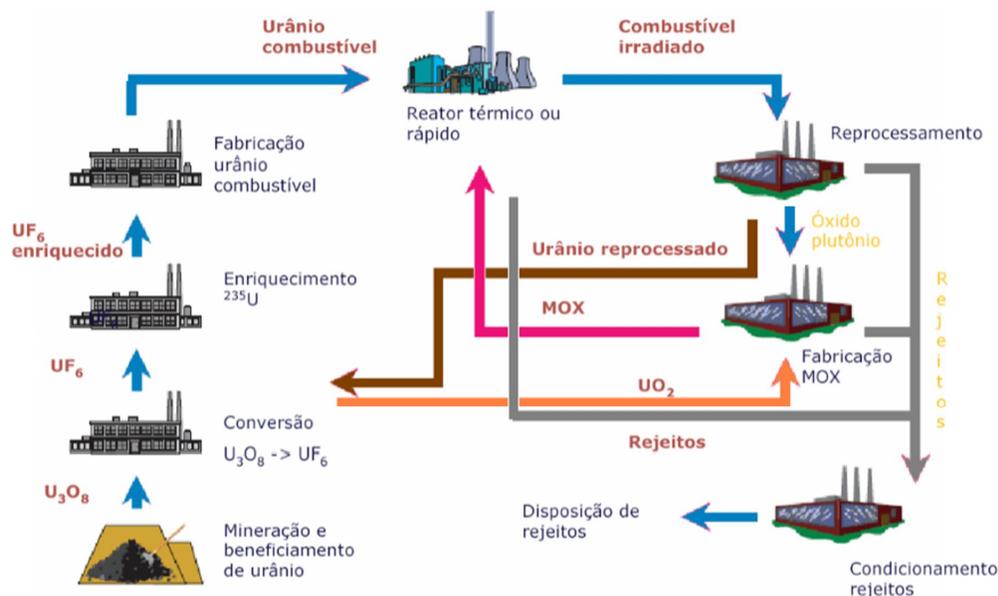


Fonte: Ambiente Brasil (c2011)

Segundo a INB, O Ciclo do Combustível Nuclear se resume em um conjunto de etapas do processo industrial que visa transformar o mineral urânio, desde quando ele é encontrado em estado natural até sua utilização como combustível, dentro de uma usina nuclear. Sendo assim existem dois tipos de processos no qual o mineral urânio é transformado, são eles: Ciclo Fechado e Ciclo Aberto. O ciclo fechado, mostrado na Figura 9, trabalha com o reprocessamento do combustível, ocorre em países como França, Bélgica, Inglaterra e Japão. Por sua vez, o ciclo aberto (Figura 10) prevê uma certa disposição do combustível usado, este processo é o que se usa no Brasil e usado também nos Estados Unidos da América. (SOARES; REIS, 2012)

A mineração e estudos das jazidas é a primeira parte na etapa do ciclo do combustível. Consiste em determinar um local onde será extraído o minério, levantar uma avaliação econômica, incluir a coleta e análise de amostras de solo e rochas da superfície como também a vegetação e amostragem de água e ar. (LIMA, 2008) Por fim, deve-se também realizar levantamentos geofísicos da superfície (SILVA, 2011). Segundo (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2009), a outra fase inclui a perfuração, cubagem, escavação, e também, a criação de plantas piloto ou de instalações de testes.

Figura 9 - Processamento: Ciclo Fechado



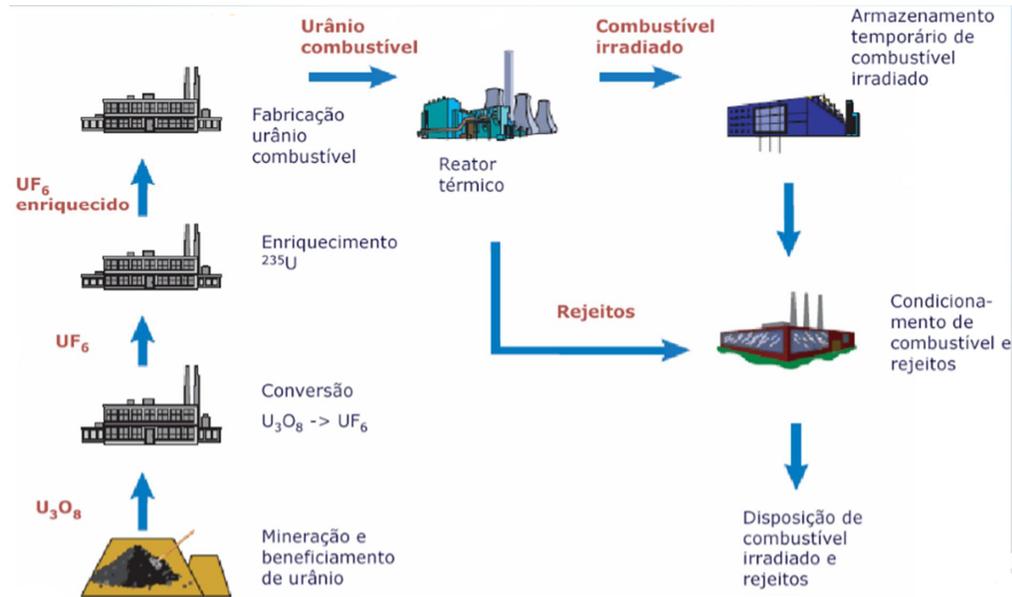
Fonte: Soares e Reis (2012).

O urânio pode ser extraído por processos básicos como: mineração subterrânea, mineração a céu aberto ou lixiviação *in situ* (LIS), subproduto da exploração de cobre e ouro, entre outros. (SILVA, 2011)

O método de mineração subterrânea consiste na exploração dos corpos de minérios que estão bem abaixo da superfície, no qual utilizam eixos afundados na terra. Já o método a céu aberto é usado em minérios que estão perto da superfície e em ambos os processos o material é processado em um moinho que separa o minério do urânio. Pode ser obtido também como um subproduto do processamento

de minerais, como a produção de fertilizantes fosfatado, que inicialmente seriam resíduos e não aumenta potencialmente os impactos ambientais adversos (SILVA, 2011)

Figura 10 - Processamento: Ciclo Aberto



Fonte: Soares e Reis (2012).

A lixiviação consiste no ataque químico dos minérios com dissolução seletiva dos mesmos, portanto o processo por LIS, se dá pela inserção de uma solução lixivadora no corpo do minério, que irá circular através dos poros e com isso extrair e dissolver o minério em um outro poço, o produto chama-se “licor de urânio”. A solução lixivadora bombardeada varia de acordo com o minério, no caso do urânio pode ser uma solução ácida, como ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou ácido nítrico (HNO_3) que é menos comum, mas também pode ser uma solução de carbonatos, como bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$), carbonato de amônio ($(NH_4)_2CO_3$), ou dissolução de dióxido de carbono (CO_2). (SILVA, 2011)

Dentre os métodos de extração mais usados, a pilha de lixiviação é a que está sendo mais usada para a extração de minérios com baixo grau de urânio. (SILVA, 2011)

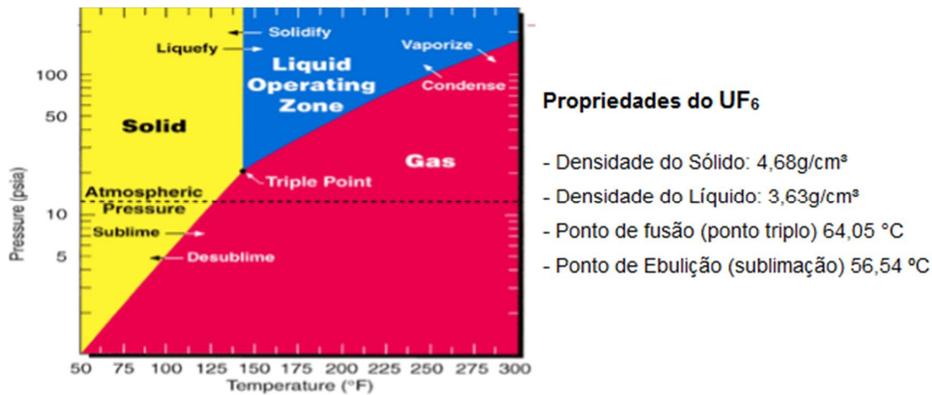
No processo de extração e processamento do minério de urânio os níveis de radioatividade são altamente monitorados e controlados pelos órgãos reguladores, afim de se prevenir possíveis contaminações em qualquer etapa do processo. (SOARES; REIS, 2012)

Depois de filtrado e decantado, o licor passa pela etapa de beneficiamento onde será purificado e concentrado, utilizando-se um processo de troca iônica. A solução é seca em um forno com o intuito de remover impurezas. Após a secagem é obtida uma pasta que recebe o nome de “*yellowcake*” tendo uma nova formulação, o octaóxido de triurânio (U_3O_8). (SILVA, 2011)

5.5 CONVERSÃO DO URÂNIO

A manipulação do *yellowcake* gera um pó que é tanto quimicamente quanto radioativamente perigoso, por isso ao ser exposto e manuseá-lo, o local de trabalho deve ser confinado e controlado. (SILVA, 2011)

Segundo Lima (2008) as fases de operação de secagem são mantidas sob pressão negativa, no qual os gases de escape passam em sistemas de coleta de pó, impedindo possíveis perdas do *yellowcake*. O processo de conversão do urânio se dá na transformação do *yellowcake* (U_3O_8) em hexafluoreto de urânio (UF_6), que se baseia em um conjunto de processos químicos e físicos. O UF_6 é sólido em temperatura ambiente, mas com pequenas elevações na temperatura, se torna gás o que facilita o manuseio no processo de enriquecimento. Pode-se ver algumas propriedades do UF_6 na Figura 11. (SOARES; REIS, 2012)

Figura 11 - Propriedades do UF₆

Fonte: Soares e Reis (2012).

Nota: adaptado pelo autor

O processo de conversão do *yellowcake* (U₃O₈) em UF₆ pode ser dividido em duas fases. Uma delas é obter o nitrato de uranila hexahidratado (UO₂(NO₃)₂•6H₂O) purificado, envolvendo uma dissolução do concentrado de urânio com ácido nítrico, que após ser calcinado, tem-se um pó, o trióxido de urânio (UO₃). É adicionado então o ácido fluorídrico (HF) no produto, convertendo-o em tetrafluoreto de urânio (UF₄), possuindo uma coloração verde e características granulares. A outra parte consiste em converter o UF₄ em UF₆. Neste processo, o flúor (F₂) utilizado provém da eletrolise do ácido fluorídrico (HF). (SILVA, 2011)

Segundo a Nuclear Fuel Cycle Information System IAEA. (2009) não haverá a necessidade de construir novas instalações de conversão em curto prazo, pois as atuais fábricas suprem esta necessidade.

5.6 ENRIQUECIMENTO ISOTÓPICO

Uma das fases mais importantes do processo de beneficiamento é o enriquecimento do urânio, onde ele vai ser concentrado. Atualmente, o processo aqui no Brasil é feito no exterior e enviado em *containers* para o próximo processo. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Como já discutida na Seção 5, tem-se as seguintes concentrações de urânio e seus isótopos: 99,284% de ²³⁸U, 0,711% de ²³⁵U e 0,0054% de ²³⁴U. O ²³⁸U só consegue sofrer fissão com nêutrons de elevada energia cinética, enquanto o ²³⁵U necessita preferencialmente dos de baixa energia, sendo ele o urânio físsil e mais

usado como combustível nuclear. Como sua proporção é menor, justificamos então o enriquecimento do mesmo. (CARDOSO, 2010)

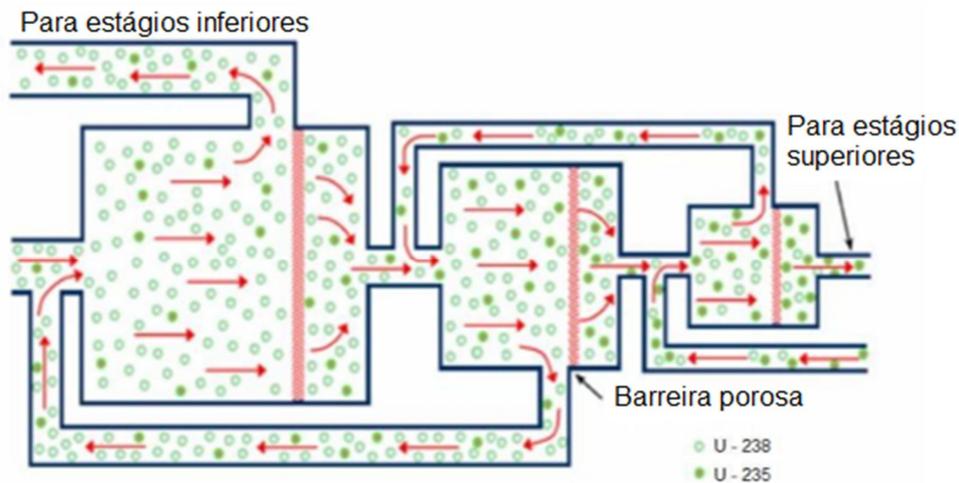
O enriquecimento isotópico tem como objetivo separar a quantidade dos isótopos e aumentar a proporção do ^{235}U de 0,711% para o valor necessário, aproximadamente 3,75%. (SOARES; REIS, 2012)

É bastante difícil fazer a separação dos isótopos e produzir maiores concentrações de ^{235}U . A maioria dos processos se baseiam na diferença de massa, que, no entanto é bem pequena, onde o ^{235}U é apenas 1,26% mais leve que o ^{238}U e se aplicar o fator da conversão, o $^{235}\text{UF}_6$ é apenas 0,852% mais leve que o $^{238}\text{UF}_6$. É importante lembrar que o processo de enriquecimento é o que mais reúne complexidade tecnológica entre os processos na obtenção do ciclo do combustível, pois lida com muitas exigências técnicas e controle restritos. (SILVA, 2011)

Há vários métodos e técnicas para se fazer o enriquecimento do urânio, mas somente dois processos são viáveis para a produção industrial: o processo por difusão gasosa e o processo de ultracentrifugação. (SOARES; REIS, 2012)

O processo por difusão gasosa baseia-se no uso da diferença de velocidade das moléculas dos isótopos de urânio em uma determinada temperatura. O que torna o processo um pouco complexo são as barreiras de efusão (membranas semipermeáveis), ou estágios, para que se concretize o enriquecimento, como vista na Figura 12. Vários problemas podem ser encontrados, como o entupimento das barreiras com sólidos, vazamentos durante o processo, a questão das barreiras e devido ao grande número de estágios, pode haver a formação de massa crítica devido a concentração de urânio em componentes sólidos. Neste caso, não é necessária uma blindagem especial, pois a radioatividade não se torna um problema neste processo. (SOARES; REIS, 2012)

Figura 12 - Processo de difusão gasosa no enriquecimento do urânio



Fonte: Soares e Reis (2012).

Na época da Guerra Fria, o procedimento por difusão gasosa foi quem desempenhou o papel importante do enriquecimento do urânio, o que continua representando cerca de 33% da produção do urânio enriquecido, apesar de que nos dias de hoje estão sendo desativadas, dando lugar às unidades industriais de ultracentrifugação. (SILVA, 2011)

O enriquecimento por ultracentrifugação foi desenvolvido na Alemanha, durante a 2ª Guerra Mundial e atualmente, menos de 10 países no mundo dominam esta tecnologia, entre eles, o Brasil. (SOARES; REIS, 2012)

No processo de ultracentrifugação, é usado uma formação de cilindros rotatórios em série e em paralelo. Cada um dos cilindros criam uma intensa força centrífuga ao girar rapidamente. As forças centrífugas girando em alta velocidade tendem a comprimir a molécula do gás utilizado na parede do cilindro, no caso o UF_6 . As moléculas mais leves, ou as de $^{235}UF_6$, que estão em uma velocidade maior tendem a ir para o centro. Este processo requer muito menos energia e atinge a mesma separação comparado ao processo anterior. (SILVA, 2011)

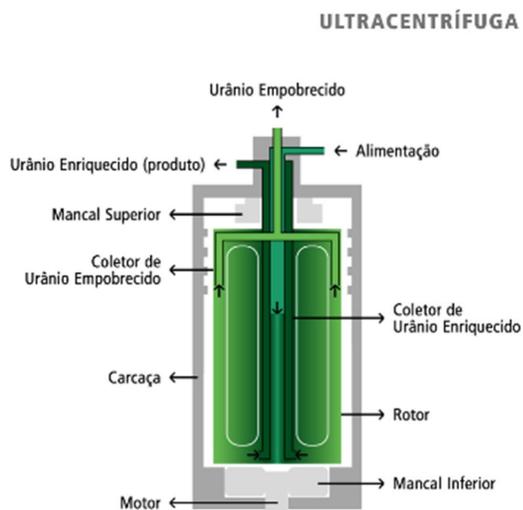
O urânio é recolhido em duas tubulações de saída, uma delas segue com o urânio com maior concentração de isótopos do ^{235}U (enriquecido) e na outra tubulação, com maior concentração do isótopo ^{238}U (chamado de subproduto, ou urânio empobrecido), como visto na Figura 13.(SOARES; REIS, 2012)

Como são usadas grandes quantidades de material enriquecido no reator como suprimento nuclear, é preciso repetir muitas vezes a operação para se obter a quantidade ideal e o teor de enriquecimento, pois o ganho obtido é pequeno. Com isso há a necessidade de se interligar estes estágios em série. O processo de acoplamento de vários elementos separadores em paralelo, ou as cascatas de centrífugas, tende a ser a melhor opção nessa etapa, como mostrado na Figura 14. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Os arranjos em paralelo podem fazer uma produção maior, mas talvez com baixo teor de enriquecimento, mas o arranjo em série, por exemplo, provê uma quantidade de massa menor, no entanto com alto teor de enriquecimento. Pode-se observar que o processo recicla o urânio a todo momento, onde o produto de um dos estágios de enriquecimento é levado para alimentação do estágio seguinte, levando o rejeito do primeiro estágio para a alimentação do estágio anteriores a ele. (SILVA, 2011)

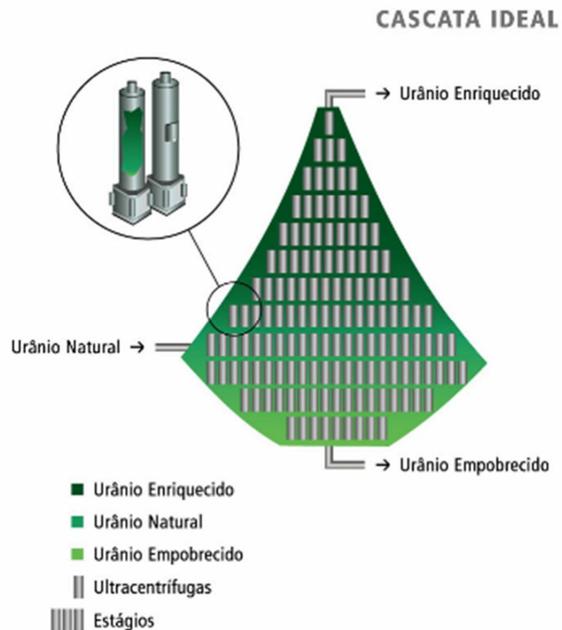
O segredo dessa tecnologia de enriquecimento visa criar uma máquina que tenha performance boa, grande capacidade produtiva, custo baixo e pouca manutenção, pois são projetadas para operar por muito tempo sem manutenção. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Figura 13 - Processo de ultracentrífuga



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil – INB (c2014)

Figura 14 - Modelo de Cascatas



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil – INB (c2014)

É sempre bom lembrar que a separação isotópica na centrífuga pode ser considerado um processo termodinâmico reversível, levando em conta que o consumo de potência é muito menor, o que ganha vantagem em relação ao processo por difusão gasosa. (SOARES; REIS, 2012)

Dependendo da finalidade no qual se usará o combustível nuclear, pode-se definir o grau de enriquecimento do mesmo. O urânio de baixo enriquecimento LEU (*Low Enriched Uranium*) tem um teor de concentração inferior a 20%, onde sua utilidade principal é no setor comercial, alimentando reatores do tipo PWR (reator de água pressurizada, do inglês *pressurized water reactor*) e de pesquisa. Se o grau de concentração do urânio for superior a 20%, pode ser classificado como HEU (*Highly Enriched Uranium*). (SILVA, 2011)

Para aplicações como a produção de armamento nuclear, a concentração de ^{235}U varia de 85% para mais, porém uma menor quantidade do material, a massa crítica, que é enriquecida a 20% mais ou menos, já é suficiente para acionar o processo de reação em cadeia pelos nêutrons rápidos. (SILVA, 2011)

Em reatores de potência, por exemplo do tipo PWR, bastante usado no Brasil, temos o enriquecimento do urânio por volta dos 3,5%. Em reatores de pesquisa ou propulsão, usados como fonte de energia de motores de submarinos e navios, o enriquecimento do urânio varia bastante. Já o enriquecimento para confecção de bombas nucleares, o grau pode chegar a 90% ou superior. (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005)

O combustível utilizado nos reatores brasileiros pode ter todas suas etapas produzidas aqui no Brasil, mas comercialmente fica mais viável fazer a conversão e o enriquecimento no exterior (GONÇALVES; ALMEIDA, 2005)

5.7 RECONVERSÃO

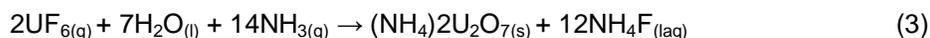
Após ser enriquecido, no Brasil, o UF₆ é enviado em recipientes para a Fábrica de Combustível Nuclear, em Resende, no Estado do Rio de Janeiro, onde será realizado o processo de Reconversão. (SOARES; REIS, 2012)

No processo de reconversão, de forma geral, o hexafluoreto de urânio (UF₆) é transformado em dióxido de urânio (UO₂), onde ele retorna para seu estado sólido, na forma de pó. Esta etapa do processo é equipada com equipamentos modernos e sistemas de elevada segurança, onde os técnicos treinados para esse processo passam por constante atualização. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Em escala industrial, os principais processos de obtenção do UO₂ podem ser divididos em dois processos: reconversão por via úmida e reconversão por via seca. (SILVA, 2011)

Na reconversão por via úmida, obtém-se o UO₂ por meio do diuranato de amônio (DUA) ou da redução do tricarbonato de amônio uranilo (TCAU) que precipitam em meio aquoso. (SILVA, 2011)

O DUA pode ser feito a partir do UF₆ ou de uma solução de nitrato de urânio UO₂(NO₃)₂. Ao utilizar o UF₆, o mesmo é hidrolisado reagindo com amônia (NH₃), originando o produto DUA ou (NH₄)₂U₂O₇ sólido que pode ser representado na Equação 3. Já a utilização da solução de nitrato de urânio, a reação pode ser representada na Equação 4. (SILVA, 2011)

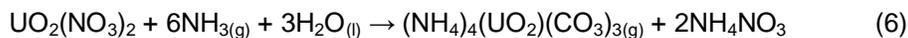
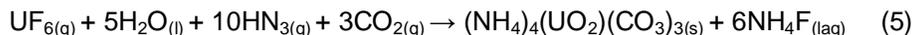




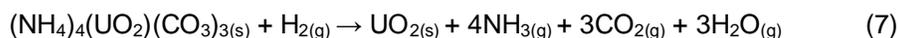
O composto é seco em um forno e tratado com vapor e hidrogênio, a fim de reduzir o DUA a UO_2 , diminuindo assim o teor de fluoreto para os níveis desejáveis. A próxima etapa consiste na oxidação controlada do UO_2 resultando em um óxido não estequiométrico. (SILVA, 2011)

Ainda dentro do processo de reconversão por via úmida, pode-se reduzir o tricarbonato de amônio e urânio (TCAU), um método que tem por finalidade reduzir o número de etapas no processo do DUA e obter um precipitado com menor teor de flúor. (SILVA, 2011)

Esta etapa consiste na evaporação do UF_6 , onde é levado para aquecimento na autoclave a uma corrente, pré-aquecida a 100 °C. Já no estado gasoso, o UF_6 é misturado com gás carbônico (CO_2) e amônia (NH_3). Ocorre então a hidrólise do UF_6 e a precipitação do TCAU em um reator químico despressurizado onde vai reagir com os gases e água desmineralizada a 100 °C. Esta reação irá produzir o TCAU, componente sólido na forma de monocristais amarelo, insolúvel em água, como apresentado na Equação 5. Pode-se utilizar o nitrato de urânio $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, ao invés do UF_6 , a Equação 6 detalha o processo. (SILVA, 2011)



Este componente é bombardeado para filtros rotativos a vácuo onde irá se decompor termicamente e reduzir para UO_2 processando-se em forno de leito fluidizado com gás hidrogênio (H_2) e vapor d'água a 600 °C, sofrendo então uma redução química para o UO_2 , como visto na Equação 7. Ainda estável, é descarregado em um estabilizador e recebe a adição de nitrogênio gasoso (N_2) e ar. (LIMA, 2008)



Após estabilizado, o UO_2 é transportado para homogeneizadores, onde é adicionado o octaóxido de triurânio (U_3O_8), estando pronto para a produção de

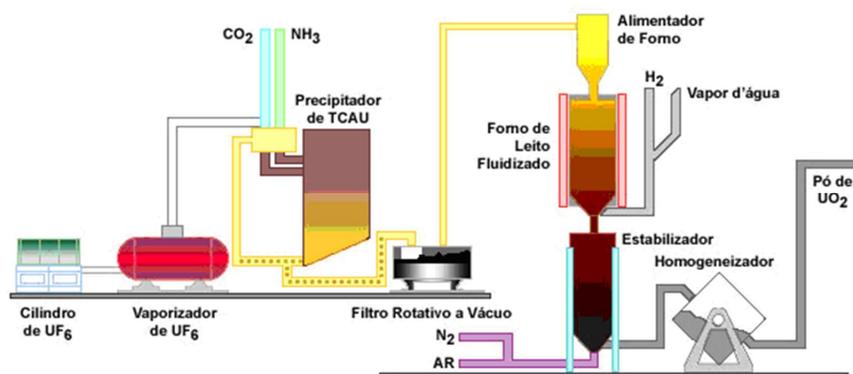
pastilhas. Este processo é desenvolvido pela INB, representado na Figura 15 (LIMA, 2008)

Durante os anos anteriores, os dois processos utilizados para reconversão por via seca são: o do leito fluidizado e o do forno rotativo com secagem integrada (IDR, do inglês *Integrated Dry Router*). O leito fluidizado consiste na hidrólise do UF_6 (algumas vezes diluído em nitrogênio) com vapor superaquecido (por volta dos 650 °C) que terá como produto final o fluoreto de urânio (UO_2F_2). Por fim é reduzido, em uma reação com gás hidrogênio (H_2), onde chega ao UO_2 , que é estável nesta reação, ocorrendo como mostra a Equação 8. (SILVA, 2011)



Por via seca em forno rotativo, basicamente acontece da mesma forma como no anterior, mas são colocados em botes e passam num forno rotativo de redução, numa temperatura entre 600 °C e 650 °C em atmosfera rica em hidrogênio (H_2) e vapor superaquecido. Neste caso o vapor é utilizado pois faz a pirohidrolise para a retirada dos íons fluoreto. (SANTOS, 1989)

Figura 15 - Processo de reconversão do UF_6



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil – INB (c2014)

Acabam tornando-se mais econômicos os processos de reconversão por via seca, pois tem um custo operacional mais baixo em relação ao processo por via úmida. Por via úmida, tem-se ainda o tratamento dos rejeitos líquidos que são

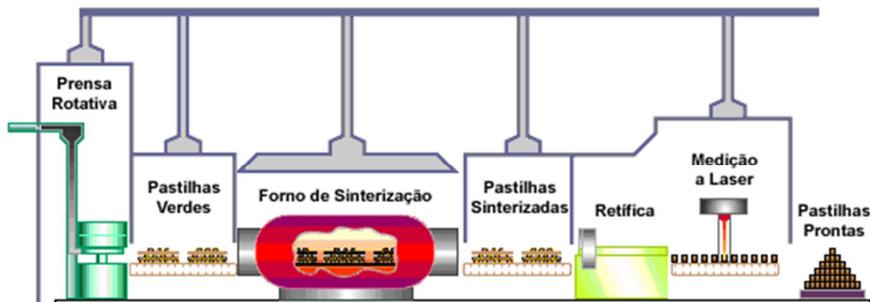
gerados no processo, o que torna o processo com um gasto energético maior. (SILVA, 2011)

5.8 FABRICAÇÃO E MONTAGEM DAS PASTILHAS

Após o processo da fabricação do pó de UO_2 , o composto é transportado para uma prensa rotativa automática e nessa prensa vão ser produzidas as pastilhas que serão a alimentação do reator nuclear. Estas pastilhas de dióxido de urânio (UO_2), tem a forma de um cilindro de aproximadamente um centímetro de comprimento e de diâmetro, são produzidas nas Fábricas de Combustíveis Nucleares que são submetidas a vários testes, entre eles: testes de dimensão, metalográficos, testes químicos, etc. Uma vez aprovado nos testes estão prontas para compor o elemento combustível, nas centrais nucleares. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Na fabricação destas pastilhas (Figura 16), inicia-se com o processo de homogeneização do U_3O_8 e com o pó de UO_2 , de que são constituídas as pastilhas. Nesta fase, são chamadas de pastilhas verdes, pois ainda são relativamente frágeis. São encaminhadas então para um forno de sinterização, sob uma temperatura de $1750\text{ }^\circ\text{C}$, que tem a finalidade de adquirir resistência e endurecer o material, necessária para as condições nas quais serão submetidas dentro de um reator na usina nuclear. Essas que são sinterizadas no forno, passam pela retificação para ajustar delicadamente suas dimensões e após passarem por essa retificação, são verificadas através de medições com laser, nas quais são rejeitadas aquelas com possíveis defeitos ou fora dos padrões adequados. As aprovadas são acondicionadas em caixas e armazenadas adequadamente em um depósito, onde contém os equipamentos mantidos sob ventilação controladas, a fim de manter a boa qualidade no ar no interior da fábrica. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Figura 16 - Produção das pastilhas



Fonte: Indústrias Nucleares do Brasil – INB (c2014)

Visando garantir um padrão em sua qualidade, as fábricas de combustível nuclear controlam os processos e os produtos intermediários para que não se perca a qualidade no produto final. O pó que vem da reconversão, o UO_2 , tem que ser analisado em detalhes em relação às impurezas químicas e parâmetros significantes para que possam ser produzidas as pastilhas. O teor de enriquecimento e quantidade de urânio contidos no elemento combustível, são valores especificados por razões nucleares, já outros correspondem a valores devido aos efeitos que podem causar durante o processo de fabricação das pastilhas. (SILVA, 2011)

O urânio contido em materiais danificados ou que não estão nas especificações corretas na fabricação das pastilhas podem ser recuperados. A recuperação pode acontecer da seguinte forma: dissolução do urânio em ácido nítrico (HNO_3) formando o nitrato de urânio ($UO_2(NO_3)_2$), segue para a purificação do urânio por extração com um solvente e a precipitação do óxido hidratado com hidróxido de amônio (NH_4OH) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2); o mesmo é secado e tem-se a formação do U_3O_8 , reduzindo a UO_2 na forma de pó. O urânio recuperado no processo pode ser transformado em pastilhas novamente, voltando à linha de produção. (SANTOS, 1979)

O elemento combustível é composto pelas pastilhas de dióxido de urânio (UO_2) montadas em uma série de tubos de liga metálica especial, chamada zircaloy, formando um conjunto de varetas selados, soldados nas extremidades, com estrutura rígida por reticulados chamados grades espaçadoras. (LIMA, 2008)

Segundo a INB, dentro dos tubos da liga (zircaloy) possui uma média de 335 pastilhas de urânio, em um conjunto de 236 tubos que formam uma estrutura

metálica presa por grades e braçadeiras, formando o elemento combustível podendo ter até 5 metros de altura e será ele quem abastecerá os reatores nas usinas nucleares. (INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, c2014)

Há uma necessidade de se revestir o combustível, para que possa ser evitado alguns problemas operacionais, tais como: corrosão do combustível pelo refrigerante, o revestimento impede a transferência de calor do combustível para o refrigerante, a retenção dos produtos de fissão quando há a quebra do núcleo do urânio durante a geração de energia e serve também para acomodar a mudança de volume do combustível. (SOARES E REIS, 2012)

O elemento que mais contribui para mecanismos de defeito na vareta é o hidrogênio. Ele conduz a hidratação do revestimento de Zircaloy, não provocando nenhum dano quando sua absorção é homogênea, mas se a absorção for localizada, pode provocar formação de hidretos que perfuram o tubo de revestimento. (SILVA, 2011)

5.9 REATORES E ENERGIA ELÉTRICA

Nos reatores nucleares são onde acontecem a fissão nuclear que transformam os combustíveis em calor movimentando as turbinas o que gera a eletricidade nas indústrias. Podem ser classificados por alguns critérios como tipo de refrigerante usado, fluxo e energia de nêutrons gerados no reator, entre outros, mas o principal destes critérios podemos dizer que é referente a finalidade à que se destinam. Perante esses critérios, podem ser divididos em dois grandes grupos: os reatores de pesquisa e os reatores de potência, onde os reatores de pesquisa são destinados a servirem como fontes de nêutrons para propósitos diversos e podem abranger experimentos em física nuclear até irradiações para aplicações que empregam a química nuclear. Já os reatores de potência são destinados unicamente para a produção de energia elétrica, como nas indústrias de Angra I e II. (TERREMOTO, 2004)

Os reatores de pesquisas, como ditos anteriormente são bastante usados como fontes de nêutrons para experimentos diversos, podem atingir uma potência nuclear de 10 kW (quilowatts) até alguns MW (megawatts), mas alguns modelos para fabricação de radioisótopos atingem por volta dos 25 MW. Uma boa parte dos reatores de pesquisa entrou em operação por volta de 1950 e início de 1960.

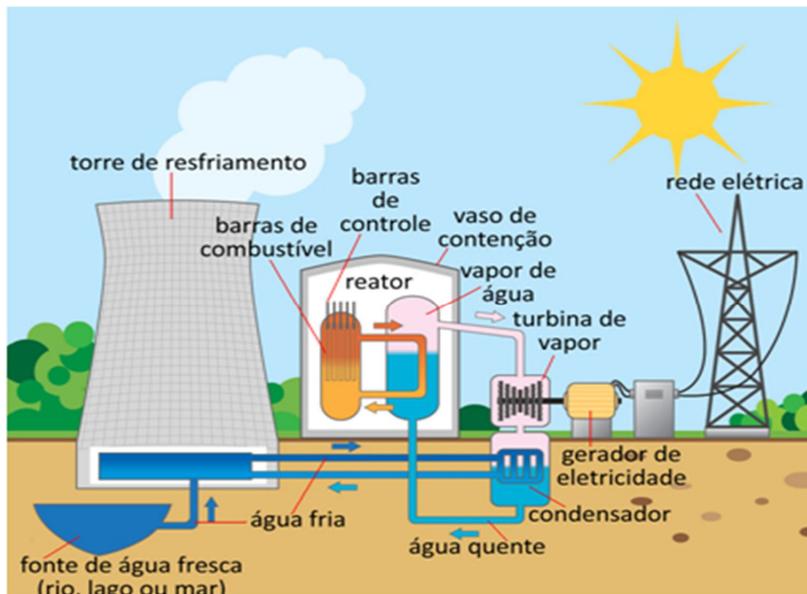
Conforme dados da AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica) em 2004, havia um total de 272 reatores de pesquisa operando em 56 países. (TERREMOTO, 2004)

Como cita Lopes (2014), pode-se designar os reatores de pesquisa como:

- Reatores para testes de materiais: onde podemos estudar o desempenho de materiais que sofrem irradiação;
- Reatores protótipos: que são reatores de baixa potência servindo de protótipo para aqueles com maior potência;
- Reatores de potência zero: que analisam propriedades neutrônicas de arranjos físséis em baixa potência;
- Reatores para produção de radioisótopos: produz radioisótopos para aplicações em medicina, agricultura e entre outras atividades industriais.

Os reatores nucleares de potência têm uma das aplicações onde é considerada a mais importante no meio nuclear, a geração de energia elétrica, como mostra a Figura 17. Pode-se medir a eficiência deste gerador de vapor com a razão entre a energia elétrica produzida com a energia térmica gerada dentro do reator na liberação de calor. (TERREMOTO, 2004)

Figura 17 - Funcionamento de uma Usina Nuclear



Fonte: Mundo educação (c2016)

Segundo Silva (2010) alguns tipos de reatores nucleares de potência podem ser mostrados na Tabela 2, são eles:

- PWR: Reatores de água pressurizada;
- BWR: Reatores refrigerados a água fervente;
- GCR: Reatores refrigerados a gás;
- AGR: Reatores avançados refrigerados a gás;
- HTGR: Reatores refrigerados a gás com temperatura elevada;
- PHWR: Reatores refrigerados a água pesada pressurizada;
- SGHWR: Reatores geradores de vapor moderado a água pesada;
- RBMK: Reatores refrigerados a água fervente e moderado a grafite;
- FBR: Reatores rápidos.

Tabela 2 - Características dos reatores de potência

Combustível	Enriquecimento	Moderador	Refrigerante	Tipo	País de Origem
UO ₂	2% a 4%	H ₂ O	H ₂ O	PWR	EUA
UO ₂	2% a 4%	H ₂ O	H ₂ O (fervente)	BWR	EUA
U metálico	-	Grafite	CO ₂	GCR	Reino Unido
UO ₂	2% a 4%	Grafite	CO ₂	AGR	Reino Unido
					EUA
ThC ₂ + UC ₂	93%	Grafite	He	HTGR	Reino Unido
					Alemanha
UO ₂	-	D ₂ O	D ₂ O	PHWR	Canadá
UO ₂	2% a 4%	D ₂ O	H ₂ O (fervente)	SGHWR	Reino Unido
UO ₂	2% a 4%	Grafite	H ₂ O (fervente)	RBMK	URSS
UO ₂ + PuO ₂	-	-	Na ⁰ líquido	FBR	Vários

Fonte: Terremoto (2004)

Em reatores de potência, existe uma substância refrigerante que circula através do núcleo do reator, permitindo assim que se remova a energia (calor) liberada pela fissão. A escolha desse refrigerante é quem influencia no projeto e também na temperatura que o reator pode operar. Tanto um gás quanto um líquido podem ser usados neste caso, sendo mais importantes a água, água pesada, sódio metálico e dióxido de carbono. Em reatores futuros há um projeto para se usar também o gás hélio (He). (TERREMOTO, 2004)

Dos reatores de potência em funcionamento hoje, a maioria é do tipo PWR, compondo uma média de 59,9% do total, outros como o tipo BWR compõem 20,9%, do tipo PHWR compõem 3,8% e outras faixas estão divididas entre os reatores AGR, GCR e FBR. (TERREMOTO, 2004)

A grande parte dos reatores que utilizam água como refrigerante e urânio como combustível podem ser chamados de LWR (*Light Water Reactors*) e possuem alguns componentes fabricados com aços inoxidáveis e ligas de níquel. São materiais que podem apresentar corrosão nas condições de operação desses reatores, pois ficam expostos a elevadas pressões e temperaturas, como também a tensões de tração podendo ocasionar trincamento dos mesmos, podendo levar tempo para aparecer. O máximo de cuidado tem que ser tomado para que o sistema não falhe, pois, os acidentes nucleares são desastrosos. (SCHVARTZMAN; MATIAS; CRUZ, 2010)

Dentro dos reatores, como mostra a Figura 17, é que ocorrem as reações nucleares, onde o vapor é produzido a partir do calor gerado nas reações de fissão, liberando energia que movimenta a turbina gerando energia elétrica. Com base nessa informação, nas usinas nucleares existem dois sistemas, são eles: sistema de geração de vapor de água e o sistema de geração de energia elétrica. O primeiro sistema envolve o reator e base da refrigeração, enquanto o segundo envolve a parte da produção de vapor de água, turbina e gerador. Deve-se medir a eficiência de uma usina nuclear usando a razão entre a energia produzida e a energia térmica gerada pelo reator. Para alcançar essa eficiência, é necessário operar a turbina na maior temperatura possível, fazendo com que o vapor de água entre o mais seco, na forma superaquecida, e ao sair, ser reaproveitado, resfriado e condensado novamente em água. (TERREMOTO, 2004)

Segundo Filho (2014) a energia elétrica proveniente da fissão nuclear é a tecnologia mais sustentável, baseada em recursos não renováveis, pois internaliza os custos da gestão de combustível irradiado, internaliza o descomissionamento da planta nuclear, como também a disposição final dos rejeitos radioativos, que não geram gases para o efeito estufa e contribuindo para a mitigação de mudanças climáticas.

Ao sofrer fissão dentro do reator, a quantidade de energia liberada é enorme, tendo um custo benefício em relação a outros materiais usados, pois segundo Cardoso (2010) e a INB, 10 g do material usado, gera uma potência equivalente a

700kg de óleo combustível ou 1.200kg de carvão, ou melhor, duas pastilhas do elemento combustível podem gerar energia (em média) para uma família de 4 pessoas durante um mês.

De certo modo, a energia nuclear hoje tem a vantagem de não emitir gases do efeito estufa. As termoelétricas emitem dióxido de carbono usando combustíveis fósseis como carvão, gás natural e petróleo. As hidroelétricas, consideradas emissões desprezíveis, emitem metano e dióxido de carbono, muito menos que as termoelétricas, mas ainda assim estão em desvantagem com a questão do meio ambiente, relacionada às usinas nucleares, como cita Rosa (2007).

6 APLICAÇÕES DA QUÍMICA NUCLEAR

Além da utilização dos elementos radioativos na produção de energia elétrica, há ainda uma infinidade de aplicações da química nuclear que já são utilizadas na sociedade, como também outras em estudo e aprimoramento tecnológico.

6.1 MEDICINA NUCLEAR

A medicina nuclear é uma área da medicina onde são utilizados os radioisótopos, tanto para tratamento, diagnósticos ou terapias nos pacientes. Os radioisótopos administrados nos pacientes passam a emitir radiações em locais fixos e precisos que podem atacar uma única célula ou conjunto sem se espalhar. Um exemplo prático e conhecido é o funcionamento da glândula tireoide e como o iodo é absorvido por ela. O uso do iodo-131 emite partícula beta, radiação gama e tem meia-vida de oito dias é absorvido pelo organismo sendo radioativo ou não. Para diagnosticar a tireoide, o paciente consome uma solução com iodo-131, é absorvido pela glândula e ao passar um detector na frente do pescoço, pode-se observar como e quanto foi absorvido. (CARDOSO, 2010)

Os radiofármacos que são usados em medicina no Brasil na maioria das vezes são feitos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), em São Paulo. Nem todas as empresas podem manuseá-los por se tratar de emissores de radiação ionizante, podendo ser ligadas a moléculas de interesse biológico. Se o radionuclídeo for emissor de radiação eletromagnética (raios gama), é possível mapear o quanto o material fica distribuído dentro do organismo. Se o radionuclídeo for um emissor de partículas, é possível fazer terapias específicas, como por exemplo, em tumores. (POZZO et al., 2014)

A radioterapia, uma parte da medicina, consiste em eliminar tumores cancerígenos utilizando fontes de radiação gama, raios-X ou fonte de elétrons. Tem como base eliminar as células cancerígenas a fim de evitar que as mesmas cresçam e se proliferem. Segundo Cardoso (2010), o tratamento é feito com doses altas de radiação, programadas e controladas para que atinja somente as células alvo e não causar dano aos tecidos saudáveis. Por conta das doses fortes e alta de radiação, os

pacientes ficam debilitados, precisando ser cuidadosamente acompanhados. (CARDOSO, 2010)

A braquioterapia é um tratamento com isótopos radioativos que tem funcionalidade de reduzir tumores. São usadas fontes emissoras de radiação gama de baixa e média energia encapsuladas em aço inox ou platina, que são colocadas próxima aos tumores que vão ser afetados mais fortemente pela radiação. (ALMEIDA, 2004)

Na maioria dos casos, os radioisótopos tem tempo de meia-vida curto e ao recebê-los o paciente se torna uma “fonte radioativa”, tendo que esperar um tempo para que não cause irradiação a pessoas próximas. (CARDOSO, 2010)

Como temos isótopos para tratamento e terapias na medicina, temos também a parte dos diagnósticos como a radiografia e a tomografia. São processos no qual é revelado imagens passando um feixe de raios-X ou raios gama através da região de estudo, claro que com uma energia adequada. Por conta dos danos causados pelas radiações, os exames não devem ser feitos sem necessidade, nem pelos pacientes expostos, nem pelos operadores, que devem ficar um pouco mais afastados quando sem proteção. (ALMEIDA, 2004)

É importante lembrar que todas operações nas quais se utilizam a exposição à radiação, devem ser usados coletes ou biombos de chumbo para proteger o restante do corpo (fora da região de estudo). Como há muitas dúvidas sobre esse assunto, um objeto ou corpo quando irradiado, ou seja, exposto a radiação, não se torna radioativo, mas podendo se tornar radioativo quando contaminado pela presença indesejável de um material radioativo, onde o corpo neste caso, se torna uma fonte de radiação. (CARDOSO, 2010)

6.2 RADIAÇÃO NA AGRICULTURA

Atualmente os radioisótopos tem ganhado bastante espaço na agricultura. Hoje, é possível acompanhar o metabolismo das plantas verificando o que elas precisam para crescer, o que é absorvido pela planta e também algum elemento que ficou retido na produção. (CARDOSO, 2010)

Os radioisótopos na agricultura são usados não diretamente no cultivo da terra, mas bastante utilizado nos estudos relacionados nessa área e no combate contra as pragas por radiação controlada. É importante lembrar que além dos

benefícios que a radiação traz para o alimento, eles podem também perder nutrientes ou acabar degradando alguns compostos essenciais daquele alimento em específico. As radiações podem ser usadas para impedir a deterioração dos alimentos nos mercados onde se matam ou esterilizam insetos que atacam esses alimentos. Um exemplo é a seguinte aplicação: os insetos são criados em laboratório em massa e esterilizados por uma carga grande de radiação modificando assim seu organismo, em seguida são liberados na região infestada (por exemplo, no campo) e o acasalamento improdutivo fazem com que levem à extinção da espécie ou a modifique. Um exemplo de uso desta técnica é ser empregada no combate às moscas que atacavam os laranjais, entre outros frutos. (ALMEIDA, 2004)

Uma técnica bastante interessante relacionada aos insetos na agricultura, é o uso da radiação para estudo do comportamento dos mesmos, onde ao ingerirem os radioisótopos passam a emitir radiação podendo ser acompanhados, isso possibilita descobrir, por exemplo, onde ficam os formigueiros, ou as flores que as abelhas preferem. (CARDOSO, 2010)

Saindo do campo dos insetos e entrando no campo dos alimentos, as radiações podem ser benéficas para a preservação dos alimentos, pois quando irradiados atacam os fungos e bactérias, permanecendo bons para o consumo por muito mais tempo. Por segurança, é preciso que os átomos radioativos cessem suas atividades antes de serem embalados, evitando assim qualquer carga radioativa no material de consumo. (CARDOSO, 2010)

A Universidade de São Paulo (USP) tem um instituto especializado, fundado em 1966 chamado CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, que estuda e desenvolve pesquisas relacionadas a esta área, que tem como missão, difundir conhecimento científico e tecnológico, para melhoria da produção e oferta de alimentos saudáveis, sempre em defesa do meio ambiente. (CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA, c2015)

6.3 RADIAÇÃO NA INDÚSTRIA

Além de diversas aplicações que vemos dos radioisótopos, podemos citar também o uso dos mesmos na indústria, onde é realizado a radiografia de peças metálicas ou a gamagrafia industrial, que consiste na impressão da radiação gama em filmes fotográficos. A gamagrafia pode ser usada na área de Controle da

Qualidade nas indústrias, que verificam se há algum defeito ou deformação no copo das peças. É bastante comum as empresas de aviões usarem dessa técnica para inspeções frequentes, ou se há fadiga nas partes metálicas e nas soldas (exemplo: asas e turbina) que exigem maior esforço e sofrem um maior impacto quando em movimento. (CARDOSO, 2010)

Ainda na parte industrial, geralmente são utilizadas fontes de radiação gama, como o céscio-137 e o cobalto-60 para produzir imagens em filme adequado, que são formadas pelos raios que passam através do objeto de exame, o que permite testar e avaliar um objeto sem danificá-lo. (ALMEIDA, 2004)

A indústria farmacêutica também pode utilizar fontes radioativas para a esterilização de seringas, luvas, gaze entre outros materiais descartáveis em geral, pois no modo convencional de esterilização, seria impossível pela necessidade de altas temperaturas que deformaria ou danificaria os materiais, como em autoclaves em calor úmido, ou em estufas utilizando calor seco. (CARDOSO, 2010)

Uma aplicação que pode ser encaixada na parte industrial, é a datação por carbono-14, que resulta na absorção contínua dos nêutrons dos raios cósmicos pelos átomos de nitrogênio nas altas camadas da atmosfera. O carbono-14 é um isótopo radioativo do carbono e se combina com o oxigênio, dando origem ao dióxido de carbono ($^{14}\text{CO}_2$), que é absorvido pelas plantas, seres humanos e animais. Os fósseis de madeira, papiros e animais contêm o carbono-14, cujo tempo de meia-vida é de 5.600 anos. Ao medir a proporção de carbono-14 ainda existente nos materiais, é possível saber a "idade" destes materiais, bem como descobrir a idade de árvores antigas e até mesmo descobrir em qual década foram escritos pergaminhos de escavações e explorações arqueológicas. (CARDOSO, 2010)

7 RESÍDUOS NUCLEARES

Ao final do processo de geração de energia elétrica no reator, o subproduto restante são os rejeitos radioativos, ou resíduos nucleares. Segundo a CNEN, esse rejeito que sobra no fim do processo pode ser definido como qualquer material resultante de atividades humanas que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção especificados na Norma CNEN-NE 6.02. (JESUS, 2013)

Pode ser considerado como baixa e média atividade, aqueles rejeitos que resultam de materiais contaminados durante a operação de unidades nucleares e radioativas, como alguns EPI's. Os rejeitos considerados como de alta atividade são aqueles gerados durante a fissão do urânio dentro dos reatores nucleares, pois permanecem radioativos por um certo período de tempo. A CNEN é quem estabelece os níveis de concentração permitida para eliminação dos rejeitos no Brasil. (JESUS, 2013)

Todas as etapas de processo na produção de energia elétrica pela fissão nuclear geram algum rejeito radioativo, podendo ser reutilizados ou não, onde existe basicamente três alternativas possíveis para o ciclo do combustível nuclear, sendo eles a operação do ciclo do combustível sem reciclagem do urânio, a operação do ciclo do combustível com a reciclagem do urânio e a terceira alternativa que pode ser definida como a operação do ciclo do combustível com reciclagem do urânio e plutônio. (SILVA, 2011)

Ao sair do reator, pode-se comparar a diferença entre as alternativas, que podem ser transferidas para usinas de reprocessamento, onde será reciclado parte do rejeito que pode ser aproveitado, ou ser armazenado e possivelmente descartado. (SILVA, 2011)

A radioatividade dos rejeitos produzidos na mineração é bastante baixa onde podem ser usados os mesmos métodos para materiais considerados não-radioativos. Pode ser considerado os rejeitos dessa etapa as partículas de urânio em suspensão e do radônio, bem como seus produtos de decaimentos, a água da drenagem da mina no processo de lixiviação que contem partículas de urânio e uma pequena parte do urânio sólido perdido, que está com a radioatividade bem abaixo dos limites de detecção. (SANTOS, 1979)

Na etapa do beneficiamento do urânio, podem ser encontrados partículas em suspensão e gases radioativos provenientes da pulverização do urânio, que são liberadas no sistema de ventilação e ficam dispersas no interior da indústria. No processo de trituração da lixiviação, é encontrado rádio-226 e tório-230 que se estiverem acima da concentração permitida, não podem ser descartados na natureza, sendo submetido a um tratamento. (SANTOS, 1979)

No processo de conversão do urânio para UF_6 , os líquidos mais contaminados provêm da extração com solventes, que são armazenados em tanques para evaporação. Os resíduos produzidos são algumas cinzas que contém ferro, alumínio, cálcio, magnésio e cobre, sendo embalados e enterrados. (SANTOS, 1979)

Ao entrar no enriquecimento, é produzido a parte do urânio que segue para a formação das pastilhas, mas nesse processo também são produzidos grandes quantidades de urânio empobrecido, que são armazenados em cilindros especiais na forma de UF_6 . Nessa etapa os resíduos gerados são provenientes da limpeza dos equipamentos que contém fluoretos, nitratos e cloretos contaminados com urânio, que normalmente são embalados e enterrado próximo a usina. (SANTOS, 1979)

Na reconversão do urânio para forma de pó (UO_2) e na fabricação das pastilhas têm-se o ar carregado de partículas provenientes da conversão e de operação da recuperação do urânio nos equipamentos, que passam por meio filtrantes para retirada das partículas em suspensão antes de ser liberado na atmosfera. Alguns líquidos provenientes da limpeza dos equipamentos contém tório-234, que é um produto do decaimento do urânio-238 e possui meia-vida de pouco mais de 3 semanas, tendo sua quantidade aumentada quando vai produzindo mais combustível. Já os precipitados de fluoreto de cálcio (CaF_2) contaminado, obtido no processo de reconversão, são acondicionados e enterrados na própria usina. (SANTOS, 1979)

Após a irradiação dentro do reator, o combustível é retirado e armazenados em tanques especiais para diminuição do calor gerado e permitir o decaimento dos núcleos de meia-vida curta. São transportados às usinas de reprocessamento permanecendo fora das usinas primárias. (SANTOS, 1979)

Basicamente os rejeitos nucleares obtidos dentro da indústria nuclear podem ser classificados em relação ao seu estado físico os resíduos gasosos, os resíduos líquidos e os resíduos sólidos. (SANTOS, 1979)

Os resíduos gasosos são nuclídeos em forma gasosa que geralmente causam contaminação no ar do prédio podendo ser de ativação do ar próximo ao vaso de pressão do reator e também do escape de substâncias radioativas, resultado das falhas do circuito. Essas substâncias que escapam do circuito são retiradas da usina e normalmente filtradas, diluídas e liberadas na atmosfera, não oferecendo mais riscos. (ENOKIHARA, 1983)

Os resíduos líquidos passam por um sistema de tratamento que é composto por evaporadores, filtros e trocadores iônicos, que são coletados posteriormente para que seja monitorada sua atividade. Caso os líquidos não estejam na forma correta para ser liberados no meio ambiente, esses efluentes voltam para o sistema de tratamento. (SANTOS, 1979)

Já os resíduos sólidos consistem, principalmente, de resinas de troca iônica. Como as substâncias concentradas no evaporador e as resinas são estocadas por um tempo para serem acondicionadas em recipientes metálicos, alguns materiais maiores, são retalhados, descontaminados e acondicionados, como as barras de controle, entre outros. (ENOKIHARA, 1983)

Sobre a destinação dos rejeitos, há vários métodos propostos para esse fim e vários deles ainda em estudo, para que haja uma maneira segura e controlada de descarte e/ou reaproveitamento dos mesmos. Porém há duas alternativas a ser consideradas: o confinamento dos rejeitos radioativos dentro da Terra (no interior da crosta terrestre) ou eliminação dos rejeitos da biosfera. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

7.1 CONFINAMENTO DOS REJEITOS DENTRO DA TERRA

Segundo Piva, Farias e Ribeiro (2010) dentro da primeira etapa, no confinamento dos rejeitos radioativos dentro da Terra, foram definidos quatro ambientes:

- Fundos oceânicos;
- Camada de gelo polar;
- Depósito no solo;
- Deposição em formações geológicas profundas.

7.1.1 Fundos oceânicos

Na deposição dos rejeitos radioativos no mar tem-se grande capacidade na diluição e dispersão das massas líquidas, o que não se reconstitui em manutenção necessária da integridade dos recipientes, pois decai sua radioatividade para níveis inofensivos ao meio ambiente. Este método já foi adotado pela França, Inglaterra e Holanda, mas proibido aqui no Brasil. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

7.1.2 Camadas de gelo polar

Essa alternativa de se estocar rejeitos radioativos nas camadas polares não foi uma proposta atraente, principalmente pela desestabilidade do gelo a longo prazo, pois sabe-se que calotas polares passam por períodos de oscilação devido as mudanças climáticas. Mas por um lado, o uso da energia nuclear pode ser um trunfo na luta contra o aquecimento global e manutenção das calotas polares, pois não emite gases do efeito estufa. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

7.1.3 Depósitos no solo

Essa técnica consiste no armazenamento dos rejeitos radioativos próximo da superfície, podendo ser reciclados no futuro, porém esses depósitos estão sujeitos a ações do homem e da natureza, que segundo a IAEA, os rejeitos depositados próximo a superfície são aqueles com radionuclídeos com tempo de meia-vida curta (no máximo 30 anos) ou com tempo de meia-vida longa (maior que 30 anos) em baixa concentração. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

Tanto para rejeitos de baixo nível de radioatividade como de médio nível de radioatividade, a deposição próximo a superfície é uma técnica utilizada em vários países, sendo importante destacar que não é uma ótima opção para rejeitos com alto nível de radioatividade. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

7.1.4 Deposição em formações geológicas profundas

O armazenamento de rejeitos radioativos em formações geológicas profundas parece uma das únicas alternativas viáveis quando se fala de isolamento dos mesmos. Esse pensamento se dá pelo fato dessas formações permanecerem

intactas por milhões de anos, onde detêm os três requisitos básicos para que estejam seguro, sendo eles: o resfriamento, proteção e isolamento, sendo que a rocha envolvente é usada como dissipador de calor. A profundidade proporciona a segurança e proteção contra radiação e o isolamento devido a alta profundidade evitando o escape para a atmosfera. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

7.2 ELIMINAÇÃO DOS REJEITOS DA BIOSFERA

Alguns métodos estudados e pesquisados, consiste na utilização de foguetes e/ou naves espaciais para o descarte do material radioativo fora do planeta. Seria uma iniciativa viável pois de certo modo eliminaria todo o resíduo sem risco algum de contaminação, mas por conta das limitações de peso, elevado custo e possíveis falhas nos veículos espaciais, esta alternativa se torna inviável até o momento. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

Ainda na deposição dos rejeitos radioativos fora da camada terrestre, há um processo denominado transmutação que consiste no bombardeio de partículas provenientes das reações nucleares nos radionuclídeos, transformando-os assim em novas espécies proporcionando o decaimento radioativo mais rápido e emitindo níveis de radiação menores. Esse processo seria efetuado em um acelerador de partículas, reatores de fusão ou reatores term nucleares controlados, pois envolve o processo de separação química e o fracionamento dos rejeitos radioativos. (PIVA; FARIAS; RIBEIRO, 2010)

8 ACIDENTES NUCLEARES

A radioatividade pode se propagar pelo ar, ocupando todo o espaço, contaminando áreas, afetando plantações pela ação dos ventos. Por isso todo o tratamento e descarte apropriado deve ser feito com os resíduos gerados por essa indústria, mas isso são apenas doses pequenas de radiações. A liberação de elementos radioativos por um reator, caso haja uma explosão, é de enorme impacto e de doses letais de radiação, a uma distância gigantesca dependendo do tamanho da catástrofe. Em condições normais de operação, tendo todo o monitoramento e controle do processo, os reatores não apresentam risco algum em relação ao meio ambiente. (ALMEIDA, 2004)

Os problemas que podem surgir, são os acidentes que podem ocasionar um desastre nuclear. Apesar dos reatores não explodirem igual a uma bomba atômica, não é impossível um acidente com tamanha destruição. Por esse motivo, envolvem vários aspectos relacionados à segurança na construção de uma usina nuclear, desde a fase do projeto, até a construção de equipamentos. Portanto para a operação de um reator, são projetados sistemas de segurança para que caso venha a ocorrer alguma falha, caso o reator dê algum problema, algum comando terá de realizar a parada imediata do reator. (CARDOSO, 2012b)

Na projeção de uma usina, são imaginados possíveis acidentes, tanto pela falha humana como pela mecânica, sendo assim necessário que haja treinamento e operadores capacitados para tal atividade. No Brasil, existem as usinas localizadas no município de Angra dos Reais no Estado do Rio de Janeiro, sendo elas Angra I e Angra II. A cidade conta com um centro de treinamento que simula as salas de operação dentro da usina, podendo treinar assim seus operários para qualquer ocorrido. (CARDOSO, 2012b)

8.1 ACIDENTE NUCLEAR DE CHERNOBYL

Em abril de 1986, na Central Nuclear de Chernobyl, cidade de Pripjat, próxima a Kiev, na então União Soviética, hoje Ucrânia, a usina nuclear recebeu ordens para manutenção do reator nº4. Aproveitando a situação, seriam realizados vários testes sobre a refrigeração. Caso faltasse energia, o sistema de segurança deveria entrar em ação ligando os geradores. Sendo assim, era possível saber se as

turbinas seriam capazes de alimentar as bombas de refrigeração do núcleo por inércia, em um tempo mínimo de 40 segundos até que as outras bombas fossem ligadas. Neste caso, a opção mais correta seria desligar o reator, sendo operado por controles manuais. (SUGUIMOTO; CASTILHO, 2014)

O experimento foi realizado no pior momento, pois todos os sistemas de segurança estavam desligados e o fato da barra de combustível estar no final, onde tem-se o maior acúmulo de resíduo nuclear, resultando na fissão do urânio. Isso geraria uma quantidade bem maior de calor, o que seria perigoso não haver resfriamento. (SUGUIMOTO; CASTILHO, 2014)

Às 14h foram desligados os sistemas de resfriamento de emergência, resultando em um aumento na demanda de energia. A potência na madrugada do dia da manutenção estava em 3.200 MWh e foi reduzida para 1.600 MWh, chegando em 720MWh e continuava diminuindo, sendo que a potência segura para os procedimentos de manutenção seriam entre 700 MWh e 1.000 MWh, mas por ordem do engenheiro responsável, os testes seriam iniciados com a potência em 200 MWh. (SUGUIMOTO; CASTILHO, 2014)

O operador responsável pela potência não conseguiu operar corretamente deixando o sistema chegar a 30 MWh, o que ocasionou um envenenamento por Xenônio-135 (^{135}Xe), um gás, produto da fissão, que apresenta alta absorção de nêutrons. Com isso o reator não respondeu como esperado. Possuindo um total de 211 barras de controle, o máximo que poderiam ser retirados eram 181, porém o operador deixou apenas 6, fazendo com que aumentassem também os riscos do reator sofrer incontroláveis elevações de potência. (SUGUIMOTO; CASTILHO, 2014)

Normalmente, para manter a pressão da água e vapor dentro dos tubos, eram usadas 4 bombas de refrigeração pelo tipo de reator, mas neste dia foram adicionados posteriormente mais 4 bombas, fazendo com que o fluxo de vapor no controlador caísse disparando-se os alarmes. O controlador neste caso deveria desligar o reator. Quando os testes começaram, foram fechadas as válvulas, diminuindo o fluxo de água no núcleo. Neste momento o reator começou um aumento na reação criando vapor incontrolável, pois não tinha refrigeração. (SUGUIMOTO; CASTILHO, 2014)

No momento em que perceberam o que estava ocorrendo, foi ordenado a inserção das barras de controle novamente dentro do reator, por conta do calor formado, as barras começaram a se deformar, impedindo essa inserção, sendo

soltas dos motores para tentar controlar a situação, entrando no núcleo por gravidade. Segundo Suguimoto e Castilho (2014, p. 321),

[...] todo o grafite que existia no núcleo fez com que a força armazenada nos combustíveis fosse amplificada, quando as barras de controle foram inseridas ao invés do reator reduzir, ele aumentou sua capacidade”, ocasionando um aumento de 7% para 50% no aumento da potência.

A força exercida no sistema era além do que o projeto aguentava, onde vibrou todo o sistema e fazendo com que um equipamento de 200 toneladas caísse sobre o sistema de refrigeração. Nisso, o vapor superaquecido dentro do reator explode e uma tampa de contenção de 700 toneladas é lançada para os ares e assim destruindo boa parte do prédio. A explosão liberou materiais como plutônio, césio, estrôncio, urânio, grafite como também toda sua radioatividade para dentro e fora da usina. Totalmente destruído, o reator liberava radiação sem nenhum controle pelos próximos 8 meses. (SUGUIMOTO; CASTILHO, 2014)

8.2 ACIDENTE NUCLEAR DE THREE MILE ISLAND

O acidente de Three Mile Island, no estado da Pensilvânia, nos Estados Unidos, foi outro acidente, mas de menor impacto, onde vazou água que fazia a refrigeração dos elementos combustíveis e vapor do circuito primário, fazendo com que esquentasse demais, fundindo o reator, permanecendo confinado no vaso de pressão. Houve toda uma evacuação da área desnecessária, pois o acidente não afetou o meio ambiente pela proteção do vaso de contenção. (CARDOSO, 2012b)

8.3 ACIDENTE NUCLEAR DE FUKUSHIMA

Em 11 de março de 2011, na costa do Japão, mais especificamente em Honshu, um *tsunami* de grandes proporções, ocasionado por um terremoto de 9 graus de magnitude, invadiu toda a área onde estavam em operação quatro reatores nucleares. (LOPES, 2014)

A catástrofe gerou graves danos aos reatores, pois as bombas do sistema de emergência não entraram em operação causando o superaquecimento, fundindo-se assim os núcleos. Projetados para resistir a ondas de quase 6 metros de altura, a

central nuclear não suportou a onda de 14 metros que ultrapassou facilmente o topo do muro criado, inundando toda a planta, o gerador e os reatores, sendo difícil a chegada de ajuda imediata. (CARDOSO, 2012a)

No decorrer do acidente, aconteceu vazamento de material radioativo por toda usina, sendo detectado contaminação acima dos limites fixados em parte da agricultura como também na água do mar que ficavam próximos, sendo feito uma evacuação de 20 km de raio ao redor da usina. (LOPES, 2014)

Neste caso, não podemos julgar falha mecânica ou humana, pois foi consequência do *tsunami* provocado pelo maremoto. Não houve vítimas decorrente de contaminação, mas os trabalhadores expostos continuaram em observação. (CARDOSO, 2012a)

Este acidente na central nuclear japonesa conduziu alguns países a reverem os sistemas de segurança de suas usinas nucleares, tendo que reforçar o pensamento que até forças da natureza podem ocasionar acidentes. (SCHMIDT; HORTA; PEREIRA, 2014)

8.4 ACIDENTE NUCLEAR COM CÉSIO-137

Em setembro de 1987, na cidade de Goiânia, capital de Goiás, ocorreu um acidente parecido, mas não em nível catastrófico. Uma cápsula pesando mais de 80 Kg e contendo cerca de 93 gramas de césio-137 (^{137}Cs) sumiu do Instituto Goiano de Radioterapia, sendo vendida a um ferro-velho como sucata. O dono do ferro-velho, ao abrir a cápsula, liberou o pó de cloreto de césio radioativo ($^{137}\text{CsCl}$), de coloração azul que acometeu a saúde de sua família e pessoas que se encantaram com a cor azul brilhante. (ALMEIDA, 2004)

Pouco tempo depois, as pessoas contaminadas tanto pelo contato, quando pela propagação da radiação no ar, começaram a apresentar os sintomas básicos da contaminação, como queimaduras pelo corpo, vômitos e diarreias. Esse descuido levou a morte de algumas pessoas e outras somente à contaminação. (ALMEIDA, 2004)

[AF1] Comentário: Professor, se você reparar nas referências, tenho o mesmo autor com dois artigos do mesmo ano, portanto os dois ficam CARDOSO, 2012. Tem alguma forma de eu mudar isso, ou pode ficar assim mesmo?

8.5 BOMBA ATÔMICA

Outro fato importante são as bombas atômicas lançadas durante a Segunda Guerra Mundial. No dia 6 de agosto de 1945, os americanos lançaram uma bomba atômica (*Little Boy*, era o nome dado aquela bomba), carregada com urânio-235, na cidade de Hiroshima, devastando-a. Hiroshima foi a escolhida, pois estava intacta e segundo os americanos, os efeitos seriam espetaculares para mostrar ao mundo o tamanho do poder americano. (OKUNO, 2015)

Três dias depois, dia 9 de agosto de 1945, os americanos decolaram para Kokura, para bombardear a fábrica de armamentos japonesa, mas por falta de visibilidade, o alvo foi mudado para Nagasaki, onde a bomba atômica denominada "*Fat Man*", carregada com Plutônio-239, foi lançada. (OKUNO, 2015)

As duas bombas lançadas tem o mesmo efeito da fissão nuclear em reatores, mas estas em quantidades descontroladas e imensas dentro de si. Para se ter uma ideia, as mortes ocasionadas pelas bombas foram de queimaduras fatais e a onda de choque provocada pela reação em cadeia dos elementos ao se fissionarem onde as radiações ionizantes que contaminou toda a área foram terríveis. (OKUNO, 2015)

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descoberta da radioatividade deu origem a vários estudos tecnológicos que hoje estão inseridos no nosso dia a dia, bem como outros ainda em pesquisas, mas com uma certa probabilidade de tornar alguns processos bem mais viáveis e econômicos.

Com a descoberta da radioatividade, foi possível explorar as aplicações da química nuclear como também descobrir novos elementos, sempre avançando e buscando novas maneiras de viabilizar um processo. Foi o que aconteceu com a produção de energia elétrica a partir da fissão nuclear. Hoje a energia nuclear pode suprir a demanda mundial apenas sendo auto-sustentável.

As usinas nucleares contam com a vantagem de não gerar nenhum subproduto da combustão, pois não depende da queima para a produção de energia. Não dependendo da queima de combustíveis fósseis, também não emite os gases do efeito estufa na atmosfera, sendo neste aspecto considerada não prejudicial ao meio ambiente. Nesta perspectiva a eletricidade produzida pela fissão nuclear, é altamente estável e economicamente competitiva.

Não é só viável a utilização da química nuclear na produção de energia elétrica como também na medicina, agricultura e várias outras aplicações. Atualmente a medicina nuclear vem ganhando espaço e vem sendo utilizada em grande parte nos tratamentos de câncer, como também em vários diagnósticos. A utilização da radioatividade na agricultura vem sendo bastante eficaz no controle de pragas e na preservação dos alimentos consumidos pelo mundo todo.

Com isso, concluímos que a usina nuclear pode ter capacidade para se tornar a maior produtora de energia elétrica no longo prazo, onde o subproduto pode ser armazenado e possivelmente tratado e reciclado no futuro, para que seja aproveitado próximo de 100% da produção.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. V. **A radioatividade e suas aplicações**. São Carlos 2004. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAf90AG/monografia-radioatividade-aplicacoes>> Acesso em: 29 out. 2016.

AMBIENTE BRASIL. **Energia Nuclear – Urânio**. c2011. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/nuclear/energia_nuclear_-_uranio.html> Acesso em: 8 de out. 2016.

ATKINS, P. W; JONES, L. Química Nuclear. In _____ **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. Cap. 17, p. 735-761.

BRASIL EDUCAÇÃO. **Química Nuclear**. c2016. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/quimica-nuclear.htm>> Acesso em: 27 nov. 2016

BROWN, T. L; LEMAY JR, H. E; BURSTEN, B. E. Química Nuclear. In: _____ **Química: A ciência central**. Tradução: Robson Mendes Matos. 9 ed. São Paulo. Pearson, 2010. Cap. 21, p 771-804.

CARDOSO, E. M. **Apostila Educativa: Aplicações da Energia Nuclear**. Rio de Janeiro. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). 18 p. 2010. Disponível em: <<http://bibspi.planejamento.gov.br/bitstream/handle/identem/555/Aplica%C3%A7%C3%B5es%20da%20Energia%20Nuclear.pdf?sequence=1>> Acesso em: 26 set. 2016.

CARDOSO, E. M. **Apostila Educativa: A energia nuclear**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 3ed. 52 p. 2012a. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf>> Acesso em: 20 out. 2016.

CARDOSO, E. M. **Apostila Educativa: Energia Nuclear**. Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). s.ed. 29 p. 2012b. Disponível em: <<http://portaldaradiologia.com/wp-content/uploads/2010/03/Energia-Nuclear.pdf>> Acesso em: 26 set. 2016.

CARDOSO, E. M. **Apostila Educativa: Radioatividade**. Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). 19 p. 2000. Disponível em: <<http://portaldaradiologia.com/wp-content/uploads/2010/03/Radioatividade.pdf>> Acesso em: 24 nov. 2016.

CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA (CENA). **Institucional**.

Universidade de São Paulo (USP). Piracicaba. c2015. Disponível em:
<<http://www.cena.usp.br/home/institucional>> Acesso em: 18 out. 2016.

CHASSOT, A. Raios x e Radioatividade. **Química Nova na Escola**, v.2, p19-22, 1995. Disponível em:<<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc02/historia.pdf>> Acesso em: 20 set. 2016.

COMMISSION ON ISOTOPIC ABUNDANCES AND ATOMIC WEIGHTS (CIAAW). **Uranium**. c2015. Disponível em: <<http://www.ciaaw.org/uranium.htm>> Acesso em: 15 set. 2016.

DAVID, N. S. et al. Energia Nuclear em Questão. **Coleção Universidade e Indústria**. Rio de Janeiro: Instituto Euvaldo Lodi, 75 p. 1981.

JESUS, N. N. M. **Remoção de céσιο e amerício utilizando fibra de coco para a aplicação no tratamento de rejeitos radioativos**. 80f. 2013. Dissertação de Mestrado. (Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear– Aplicações). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em:
<http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Nella%20Nelci%20Mussugati%20de%20Jesus_M.pdf> Acesso em: 06 out. 2016.

SANTOS, J. M. E. **Análise quantitativa dos rejeitos radioativos a serem gerados no Programa Nuclear Brasileiro**. 259f. 1979. Dissertação de Mestrado. (Mestre – Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia de Combustível Nuclear). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979. Disponível em:
<http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Jose%20Mauro%20Esteves%20dos%20Santos_M.pdf> Acesso em: 28 set. 2016.

ENOKIHARA, C. T. **O armazenamento de rejeitos radioativos no Brasil com ênfase especial em rochas**. 196f. 1983. Dissertação de Mestrado. (Mestre na Área de Concentração em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983. Disponível em:
<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/094/40094780.pdf> Acesso em: 25 set. 2016.

FILHO, F. L. B. **Responsabilidade social da energia nuclear para geração elétrica no Brasil**. 117f. 2014. Tese de Doutorado. (Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014. Disponível em
<http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Francisco%20Luiz%20Biazini%20Filho_D.pdf> Acesso em: 02 out. 2016.

GONÇALVES, O. D; ALMEIDA, I. P. S. A energia nuclear e seus usos na sociedade”, **Ciência Hoje**, vol. 37, p 36-44. 2005. Disponível em: <<http://xa.yimg.com/kq/groups/22755666/617585716/name/Texto+2+A+energia+nucl ear+e+seus+usos+na+sociedade.pdf>> Acesso em: 11 set. 2016.

HIROMOTO, G. et al. **Introdução à gerência de rejeitos radioativos**, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Departamento de Rejeitos Radioativos, São Paulo, 1999.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (INB). **Combustível Nuclear**, c2014. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/interna2.aspx?secao_id=105> Acesso em: 21 set. 2016.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Establishment of uranium Mining and processing Operations in the Context of Sustainable development**. Vienna, 2009. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1401_web.pdf> Acesso em: 06 out 2016.

LIMA, C. M. **Estudo da solubilidade de compostos de urânio do ciclo de combustível em LPS**. 137 f. Tese de Doutorado (Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Física da PUC-Rio). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0412200_08_Indice.html> Acesso em: 08 out. 2016.

LOPES, B. A. **Avanços em ciência e tecnologia de reatores nucleares**. 75f. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2014.

LOVELOCK, J. **A vingança de Gaia**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2006. 160p. Disponível em: <<http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IscScript=iah/iah.xis&src=google&base=LILACS&lang=p&nextAction=Ink&exprSearch=620646&indexSearch=ID>> Acesso em: 10 set. 2016.

MARTINS, R de A. As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos. **Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 29-41, Campinas, 2003. Disponível em: <<http://www.ghtc.usp.br/server/pdf/curie-a1.pdf>> Acesso em: 18 set. 2016.

MARTINS, R de A. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. **Caderno Catarinense de Ensino de Física** 7: 27-45,1990. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/10061/14903>> Acesso em: 17 set. 2016.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Reator nuclear**. c2016. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/reator-nuclear.htm>> Acesso em: 17 nov. 2016

NUCLEAR FUEL CYCLE INFORMATION SYSTEM - IAEA: **A Directory of Nuclear Fuel Cycle Facilities**. Vienna, 2009. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1613_web.pdf> Acesso em: 06 out. 2016.

OKUNO, E. As bombas atômicas podem dizimar a humanidade-Hiroshima e Nagasaki, há 70 anos. **Estudos avançados**, v. 29, n. 84, p. 209-218, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v29n84/0103-4014-ea-29-84-00209.pdf>> Acesso em: 12 out. 2016.

POZZO, L. et al. **O SUS na medicina nuclear do Brasil: avaliação e comparação dos dados fornecidos pelo Datasus e CNEN**, São Paulo, p. 141-148, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rb/v47n3/0100-3984-rb-47-03-0141.pdf>> Acesso em: 27 out. 2016.

ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 39-58, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100005&lng=en&nrm=iso> Acesso em: 11 out. 2016.

SANTOS, L. R. **Unidade piloto de obtenção de tricarbonato de amônio e urânio**. 118f. 1989. Dissertação de Mestrado (Mestre em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 1989. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/062/22062738.pdf> Acesso em: 14 out. 2016.

SCHMIDT, L.; HORTA, A.; PEREIRA, S. O desastre nuclear de Fukushima e os seus impactos no enquadramento midiático das tecnologias de fissão e fusão nuclear. **Ambiente e Sociedade**, v. 17, p. 233-250, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v17n4/a17v17n4.pdf>> Acesso em: 28 set. 2016.

SCHVARTZMAN, M.M.A.M; MATIAS, A.; CRUZ, J.R.B. Avaliação da corrosão sob tensão em aço inoxidável AISI 321 em ambiente de reator nuclear. **Revista Matéria**, v.15,p40-49, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762010000100006&lang=pt> Acesso em: 20 out. 2016.

SILVA, A. T. Reatores nucleares de potência. **II Workshop Internacional ENUMAS**, Unicamp-Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.nipeunicamp.org.br/enumas2010/apresentacoes/Antonio%20Teixeira%20e%20Silva%20-%202020-08.pdf>> Acesso em: 17 out. 2016.

SILVA, P. H. P. **Processo de beneficiamento do urânio visando a produção de energia elétrica**. 84f. 2011. Monografia (Graduação em Física). Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <http://www.uece.br/fisica/index.php/arquivos/doc_download/89-processo-de-beneficiamento-do-uranio-visando-a-producao-de-energia-eletrica> Acesso em: 20 set. 2016.

SILVESTRE, C. H. C. et al. **A energia nuclear e seus usos na sociedade**. Bolsistas do grupo PET-Física, 2007. Disponível em: <http://trad.fis.unb.br/pet-fisica/artigos/Energia_nuclear_e_seus_usos_na_sociedade.pdf> Acesso em: 20 set. 2016.

SOARES, H. V.; REIS, P. A. L. **Ciclo do combustível nuclear**. Belo Horizonte: PCTN, 2012. 75 dispositivos. Disponível em: <http://www.cctn.nuclear.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/06/Palestra_ciclos.pdf> Acesso em: 15 set. 2016.

SUGUIMOTO, D. Y L.; CASTILHO, M. A. Chernobyl: A catástrofe. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Betim, v. 12, n. 2, p. 316-322, 2014. Disponível em: <<http://revistas.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/1506>> Acesso em: 15 out. 2016.

TERREMOTO, L. A. A. **Fundamentos de tecnologia nuclear**: reatores. São Paulo: IPEN/CNEN-SP, 2004. 120 p. Apostila. Disponível em: <<https://social.stoa.usp.br/articles/0016/2630/TNR5764-AP.pdf>> Acesso em: 20 set. 2016.

XAVIER, A. L. et al. Marcos da história da radioatividade e tendências atuais. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 83-91, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v30n1/18.pdf>> Acesso em: 17 set. 2016.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Energy for sustainable development; information and issue brief**. WNA, Reino Unido, 2002.