

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Gabriel da Cunha Machado da Silva

UMA ANÁLISE DA PRODUÇÃO E DO MERCADO DE URÂNIO

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Versão final revisada pelo orientador



Angelo Fernando Padilha

Catálogo-na-publicação

da Cunha Machado da Silva, Gabriel
UMA ANÁLISE DA PRODUÇÃO E DO MERCADO DE URÂNIO / G. da
Cunha Machado da Silva – São Paulo, 2022.
60 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Urânio 2.Oferta e Demanda 3.Energia Nuclear I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais II.t.

Gabriel da Cunha Machado da Silva

Uma análise da produção e do mercado de urânio

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do diploma em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Angelo Fernando Padilha

São Paulo

2022

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer, inicialmente, aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado e proporcionaram toda a educação que eu tenho hoje. Também agradeço aos meus irmãos que estiveram presentes nos bons e maus momentos da minha vida. Eles são a base para tudo que eu fiz e vou fazer na minha vida.

Um agradecimento especial para a minha namorada, Manuela, que é a minha maior incentivadora e sempre esteve comigo quando eu estava fazendo esse trabalho, fornecendo todo o auxílio possível para que esse trabalho fosse feito. Ela, com certeza, me transforma na minha melhor versão como pessoa.

Outro agradecimento também aos meus amigos tanto da escola quanto da faculdade que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis e nos momentos mais felizes. Especificamente, queria agradecer ao grupo de amigos, denominado Reis, que, sem eles, não seria possível passar por tantos trabalhos e provas. Uma grande felicidade poder estar se formando com o Gianluca, Guilherme e João. Outros amigos da minha graduação que merecem agradecimento é o Thales e a Mariana. Outra pessoa que me ajudou demais até a minha formação é meu melhor amigo Lucas que sempre me apoiou na graduação e me ajudou com os tópicos mais difíceis do PMT.

Além disso, fico muito feliz de ter o professor Padilha como orientador, já que ele foi sempre muito solícito para ajudar em qualquer dúvida e, desde que o projeto começou, foi um grande incentivador do tema. É uma grande honra poder ter como orientador uma das principais referências da energia nuclear do Brasil.

Mais um agradecimento aos meus amigos do trabalho, em especial ao Guilherme, Pedro e João, que, mesmo em tempos de faculdade, confiaram em mim e tiveram paciência de me ensinar sobre mercado financeiro e lições para eu levar para a minha vida.

Por fim, queria agradecer a Escola Politécnica e todos os professores do PMT que ensinaram com maestria todos os tipos de assuntos e, mesmo em tempos de pandemia, não deixaram de passar o ensino com qualidade.

RESUMO

Atualmente, os países estão sendo forçados a alterar suas matrizes energéticas a fim de evitar depender de outros países para poder gerar energia. A guerra entre a Rússia e a Ucrânia contribuiu bastante para agilizar a discussão sobre quais seriam alternativas energéticas para cumprir tanto com a meta de redução de gás carbônico quanto para suprir os combustíveis fósseis.

A energia nuclear, ao longo dos últimos anos, perdeu relevância por conta de diversos fatores, sendo o principal: os acidentes, como o de Fukushima. Mas, a movimentação recente de diversos países buscando investir mais em outras fontes de energias proporciona uma motivação maior na indústria nuclear.

Assim, esse trabalho procura detalhar e analisar o mercado de urânio e entender quais serão os próximos passos. Para chegar nesse objetivo, é feito um mapeamento de duas variáveis que são determinantes para projetar o futuro do urânio: oferta e demanda. Com base nesses dois parâmetros, será analisada as principais regiões do mundo, além de entender sobre a indústria nuclear e as empresas que compõe essa indústria.

Palavras-chave: Urânio; Guerra Rússia e Ucrânia; Mercado; Oferta; Demanda.

ABSTRACT

Currently, countries are being forced to change their energy matrices in order to avoid depending on other countries to generate energy. The war between Russia and Ukraine contributed a lot to streamline the discussion on what would be the energy alternatives to meet both the carbon dioxide reduction target and to supply fossil fuels.

Nuclear energy, over the last few years, has lost its reputation due to several factors, the main one being: accidents, such as the one at Fukushima. But, the recent movement of several countries seeking to invest more in other sources of energy provides a greater motivation in the nuclear industry.

Thus, this work seeks to detail and analyze the uranium market and understand what the next steps will be. To reach this objective, a mapping of two variables that are decisive for projecting the future of uranium is carried out: supply and demand. Based on these two parameters, the main regions of the world will be observed, in addition to understanding the nuclear industry and the companies that make up this industry.

Keywords: Uranium; Russia and Ukraine War; Market; Offer; Demand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Ciclo do combustível nuclear [5].....	14
Figura 3.2: Área de mineração na cidade de Lagoa Real [6].....	15
Figura 3.3.: Esquematização do projeto de lixiviação in situ [9].....	17
Figura 3.4: Detalhamento da lixiviação em pilhas [10].....	18
Figura 3.5: Processo de centrifugação, uma das técnicas de enriquecimento [11].....	20
Figura 3.6: Fluxograma do processo de reconversão [13].....	22
Figura 3.7: Resultado da fabricação de pastilhas - pellets de urânio [14].....	22
Figura 3.8: Estrutura com varetas que englobam os pellets de urânio [16].....	24
Figura 3.9: Fluxograma de um reator nuclear para geração de energia [17].....	25
Figura 3.10: Armazenamento de combustíveis usados [19].....	26
Figura 4.1: Explosão envolvendo o acidente nuclear em Fukushima [23].....	29
Figura 4.2: Momento da explosão da bomba atômica de Hiroshima [24].....	31
Figura 5.1: Localização da antiga mina de Poços de Caldas [29].....	33
Figura 5.2: Mina em exploração na cidade de Lagoa Real [31].....	34
Figura 5.3: Local da mina ainda não explorada de Santa Quitéria [33].....	35
Figura 5.4: Evolução do fator capacidade nos EUA durante os anos [36].....	36
Figura 6.1: Comportamento do preço do urânio desde a década de 90 [45].....	42
Figura 7.1: Produção por região de eletricidade por meio da energia nuclear [28].....	47
Figura 7.2: Tendência de geração da eletricidade advinda da energia nuclear [28].....	48
Figura 7.3: Reatores em construção por país [48].....	49
Figura 7.4: Reatores desativados por país [48].....	50
Figura 7.5: Relação entre oferta e demanda por urânio [34].....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Propriedades físicas e químicas do urânio [1] 10

Tabela 1.2: Recursos de urânio por país em 2020 [2] 11

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. HISTÓRIA DO URÂNIO.....	12
3. CICLO DO URÂNIO.....	14
3.1 Mineração e Beneficiamento	14
3.1.1. <i>Processo de beneficiamento na extração de urânio</i>	15
3.1.2. <i>Lixiviação in situ</i>	16
3.1.3. <i>Lixiviação em pilhas</i>	17
3.2. Conversão.....	18
3.3. Enriquecimento isotópico	20
3.4. Reconversão	21
3.5. Fabricação de pastilhas	22
3.6. Fabricação de elementos combustíveis	23
3.7. Geração de energia	24
4. CARACTERÍSTICAS DA ENERGIA NUCLEAR	27
4.1. Riscos de Utilização	28
4.2. Bombas Nucleares.....	30
5. MERCADO.....	32
5.1. América do Sul.....	32
5.1.1. Brasil	32
5.2. América do Norte	35
5.3. Europa	37
5.4. Ásia	38
5.5. África	40
5.6. Oceania.....	41
6. ANÁLISE DO MERCADO DE URÂNIO	42
6.1. Comportamento Histórico	42
6.2. Principais Empresas.....	43
6.2.1. <i>Kazatomprom</i>	44
6.2.2. <i>Orano</i>	44

6.2.3. <i>Rosatom</i>	44
6.2.4. <i>Cameco</i>	45
6.2.5. <i>CGN</i>	45
6.2.6. <i>Outras Empresas</i>	45
7. PROJEÇÕES FUTURAS	47
8. CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

Desde sua descoberta em 1789 até os dias atuais, o urânio é um elemento químico que ganhou muita relevância devido à necessidade da sociedade em buscar novas alternativas de gerar energia. Uma dessas alternativas é a energia nuclear, que é considerada como uma energia mais limpa do que os combustíveis fósseis. Embora haja muita discussão sobre riscos e acidentes envolvendo esse tipo de energia, vários países estão procurando diversificar a matriz energética por meio da energia nuclear, dada a falta de oferta de algumas commodities essenciais, como petróleo e gás natural.

O urânio é um metal pesado que é utilizado como combustível para geração de energia por mais de 60 anos. Esse metal é muito comum de ser encontrado em rochas, na crosta terrestre e também na água do mar. Os principais minérios de urânio são a uraninita (dióxido de urânio) e a pechblenda (octóxido de urânio) [1].

Propriedades Físicas e Químicas	Valores
Cor	Branco Prateado
Densidade	18,95 g/cm ³
Dureza	6,0 (Escala de Mohs)
Entalpia de Fusão	9,14 KJ/mol
Entalpia de Vaporização	417,1 KJ/mol
Fase em CNTP	Sólido
Isótopos	11
Peso Atômico	238,03 u
Ponto de Fusão	1408 K
Ponto de Ebulição	4404 K
Solubilidade em Água	Insolúvel
Solubilidade em Outros Solventes	Solúvel em ácidos concentrados

Tabela 1.1: Propriedades físicas e químicas do urânio [1]

Utilizando como base as propriedades mostradas acima, pode-se dizer que o urânio é muito conhecido por ser um elemento radioativo, o que proporciona o uso dele como combustível devido a grande quantidade de energia gerada pelo processo de fissão nuclear que

esses elementos podem passar. Mas ele também se caracteriza por ser um elemento denso, flexível, maleável e de coloração prateada. O urânio pode ser encontrado na natureza em três isótopos, mas o mais utilizado é o 235 para material fissionável devido a diferença no nível de radioatividade dos isótopos [1] [2].

Embora o maior uso do urânio seja em geração de energia, há outras formas em que ele contribui para a sociedade, por exemplo a datação de rochas. Pelo fato de possuir uma grande cadeia de decaimento, é possível determinar a idade do material com base na meia vida do isótopo. Nesse caso, os isótopos mais usados para isso são o urânio-238 e urânio-235 [1] [2].

No Brasil pode-se encontrar diversas regiões com incidência de urânio, como na Bahia, que possui mais de 30 ocorrências, indicando uma grande concentração de urânio. A única mina de extração de urânio em funcionamento se localiza na cidade de Lagoa Real, próxima de Caetité, na Bahia. Mas outras minas devem entrar em operação nos próximos anos como é o caso de Santa Quitéria, no Ceará. A reserva de Caetité possui um teor médio de 3 000 ppm (partes por milhão), o que propicia um suprimento para toda a vida útil de dez reatores de mesmo modelo de Angra 2. No quesito de reservas de urânio, o Brasil ocupa a sétima posição no ranking mundial, liderado por Cazaquistão e Austrália, conforme ilustrado pela tabela abaixo [2] [3].

Países	Toneladas de Urânio	Porcentagem no mundo
Austrália	1.692.700	28%
Cazaquistão	906.800	15%
Canadá	564.800	9%
Rússia	486.000	8%
Namíbia	448.300	7%
África do Sul	320.900	5%
Brasil	276.800	5%
Níger	276.400	4%
China	248.900	4%
Mongólia	143.500	2%

Tabela 1.2: Recursos de urânio por país em 2020 [2]

2. HISTÓRIA DO URÂNIO

A descoberta do urânio foi feita pelo cientista alemão Martin Klaproth, que se deparou com um novo mineral: o octóxido de urânio, também conhecido como denouranilita ou pechblenda. Entretanto, há evidências de que o óxido de urânio é utilizado há muito tempo. Um dos mais antigos registros encontrados foi um vidro contendo 1% desse óxido em Nápoles na Itália, datado de 79 d.C. O primeiro cientista a isolar o elemento urânio do mineral foi o francês Eugene-Melchior Peligot em 1841, com a redução do cloreto anidro com potássio. Porém, a radioatividade do urânio só foi descoberta pelo francês Henri Becquerel, quando mostrou a relação entre os raios X e a luminescência dos sais de urânio. Em 1939, foi experimentada a fissão nuclear pelos alemães Otto Hahn e Fritz Strassman [4].

As atividades na área nuclear no Brasil tiveram início formalmente em 1951 sob o Conselho Nacional de Pesquisa, mas na área de geração de energia, o programa nuclear brasileiro começou a se desenvolver principalmente no regime militar entre os anos de 1964 a 1985. Nesse período, o governo obteve a primeira licença concedida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), para construção de um reator nuclear em 1971, fabricado pela Westinghouse. Angra 1, reator fruto desse projeto, iniciou suas operações em 1985 e está em operação até hoje. Esse reator está localizado no complexo da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro [3].

Quando o projeto de Angra 1 estava em fase de construção, houve o acordo nuclear entre o governo brasileiro e a Alemanha ocidental. Esse acordo proporcionou que houvesse a troca de equipamentos e de tecnologia envolvendo todas as fases que compõe o ciclo de produção de energia nuclear. Além disso, haveria a construção de dois reatores até 1985, com a possibilidade de construção de mais seis reatores até 1990. Vale ressaltar que uma dessas trocas nesse acordo era o de fornecimento de 20% do minério brasileiro para a Alemanha. Para justificar esse acordo, o governo brasileiro se baseava nas necessidades energéticas presentes e futuras do país, mas a realidade era que houve a crise do petróleo de 1973 e os Estados Unidos cancelaram os fornecimentos de urânio enriquecido para o reator Angra 1. Há outros motivos de longo prazo que justificam esse acordo, como o aumento da demanda energética com o crescimento populacional e a aspiração de tornar o Brasil uma “grande potência” no âmbito estratégico-militar, visto que a expertise do ciclo nuclear poderia ser utilizada para segurança nacional [3].

Em meio a esse acordo, uma empresa estatal foi constituída para que pudesse atuar com todos os aspectos da tecnologia nuclear, a denominada Nuclebrás. Apesar de todo o projeto estivesse em desenvolvimento, o Brasil entrou em uma grande crise em 1980 gerada pelo grande endividamento do País, o que ocasionou o interrompimento da construção dos dois primeiros reatores brasileiro- alemão e a reorganização de todo o programa [3].

Apesar de todas as complicações envolvendo a condição financeira do Brasil na década de 1980, houve a retomada do projeto de Angra 2 em 1995, utilizando investimentos fornecidos por bancos alemães, Furnas e Eletrobrás. Em 1997, as operações nucleares de Furnas se fundiram com a Nuclen (ex-subsidiária da Nuclebrás) para formar a Eletronuclear, que se tornou uma nova subsidiária da Eletrobrás e se responsabilizou de construir e administrar as usinas nucleares brasileiras [3].

O projeto de Angra 3 só foi retomado em 2015, com o governo anunciando que essa usina seria a última a ser construída como obra pública. Para essa construção, a responsabilidade por fabricar os equipamentos pesados é da Nuclep (ex-subsidiária da Nuclebrás). Essa usina continua em construção e deve estar em operação em 2026 [3].

Atualmente, as subsidiárias NUCLEP e a INB (que assumiu as responsabilidades do ciclo de combustível da Nuclebrás, em 1980) se reportam diretamente ao Ministério das Minas e Energia, assim como a Eletronuclear, apesar da privatização da Eletrobrás [3].

3. CICLO DO URÂNIO

O ciclo aberto do urânio se baseia nas seguintes etapas: mineração e beneficiamento, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação de pastilhas, fabricação de elementos combustíveis e reprocessamento de combustíveis usados. A imagem abaixo ilustra o passo a passo desse ciclo [5].



Figura 3.1: Ciclo do combustível nuclear [5]

3.1 Mineração e Beneficiamento

Diferentemente de outros metais, o urânio é comercializado em pó (yellowcake). Na etapa de mineração e beneficiamento, o produto da primeira parte do ciclo do urânio é o yellowcake ou concentrado de urânio.

Para se chegar em tal resultado, é preciso, inicialmente, realizar as etapas de prospecção e pesquisa mineral. Essas etapas fornecem todo o mapeamento geológico da região, além de detalhar as fases de exploração. Após toda essa pesquisa, o próximo processo é a mineração que pode ser de dois tipos: mineração subterrânea e mineração a céu aberto. A primeira consiste em extrair o minério de depósitos que se encontram em maiores profundidades com auxílio de sondas e serviços topográficos, enquanto o segundo baseia-se na extração do minério de depósitos localizados em menores profundidades até o seu esgotamento. A imagem 3.2 exemplifica uma área de mineração a céu aberto. Por fim, finaliza-se com o beneficiamento e esse pode ser dividido em três categorias: processo de beneficiamento na extração do urânio, lixiviação in situ e lixiviação em pilha [6] [7] [8] [9] [10].



Figura 3.2: Área de mineração na cidade de Lagoa Real [6]

3.1.1. Processo de beneficiamento na extração de urânio

Este é o processo mais utilizado nas minas de urânio e baseia-se em extrair o minério de urânio encontrado em poços subterrâneos profundos ou abertos rasos. Em seguida, o minério passa para os processos de trituração e remoção química do urânio, respectivamente. Depois, o urânio é concentrado, gerando um material, que por apresentar uma cor amarelada, ganhou o nome de Yellowcake [7].

A partir da chegada do minério de urânio na usina, por meio de caminhões, o minério é triturado em partículas menores e em seguida é lixiviado. Geralmente é utilizado o ácido sulfúrico como agente de lixiviação, porém é possível utilizar também soluções alcalinas. Isso depende do minério em que o urânio se encontra. O agente de lixiviação é responsável por extrair de noventa a noventa e cinco por cento do urânio do minério, além de extrair outros constituintes de metal pesado, como o molibdênio, vanádio, chumbo, selênio, ferro e arsênico [7].

Posteriormente, ocorre o processo de concentração do urânio extraído, com o intuito de produzir o Yellowcake. Esse material é transportado para uma instalação de conversão de urânio, no qual é submetido às etapas do ciclo do combustível nuclear, com intenção de fabricar combustível utilizado em reatores de energia nuclear [7].

Ao fim do processo, além do Yellowcake são produzidos também rejeitos de moagem gerados pela extração e concentração de urânio. Geralmente apresentado em forma de pasta, os rejeitos são depositados em um represamento, que demanda de um manuseamento regulado e monitorado. Isso porque, os rejeitos do moinho possuem componentes do minério de metal pesado, produzido no decorrer do decaimento radioativo do urânio [7].

3.1.2. *Lixiviação in situ*

O processo de lixiviação in situ se fundamenta no bombardeamento do lixiviante para o subsolo. O lixiviante, que é composto por água com oxigênio ou peróxido de hidrogênio e carbonato de sódio ou dióxido de carbono, dissolve o urânio na solução. Em seguida, a solução é bombeada para a superfície, na qual ocorre o processamento e concentração do urânio, produzindo o yellowcake. A figura 3.3. esquematiza esse processo [8].

A injeção da solução chamada lixiviação ocorre através de uma série de poços no corpo do minério para dissolver o urânio. Posteriormente, o lixiviante é coletado e bombeado para uma usina de processamento, no qual o urânio é extraído da solução por intermédio de um processo de troca iônica [8].

Logo após, o extrato de urânio é purificado, concentrado e seco para produzir o yellowcake. Para o transporte do yellowcake com destino a uma instalação de conversão de urânio, o material é embalado em tambores de 200 litros. Nessa instalação de conversão de urânio, esse material é processado através das etapas do ciclo do combustível nuclear com o intuito de produzir combustível para uso em reatores de energia nuclear [8].

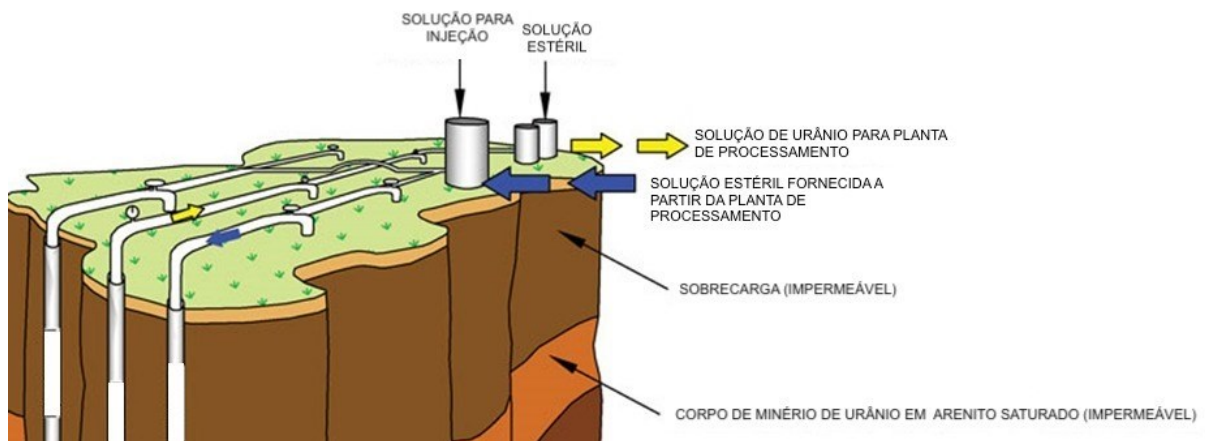


Figura 3.3.: Esquematização do projeto de lixiviação in situ [9]

3.1.3. Lixiviação em pilhas

O processo de lixiviação em pilhas tem como base a pulverização de ácido no minério de urânio. Posteriormente, o urânio se dissolve em ácido, é coletado e passa por um processo químico adicional para produzir o yellowcake [10].

Para a pulverização do ácido, pequenos pedaços de minério não triturados são colocados em uma barreira projetada, composta por uma almofada impermeável de plástico, argila ou asfalto, com tubos perfurados sob o monte. Assim, a solução ácida é pulverizada sobre a barreira para dissolver o urânio contido no minério [10].

Seguidamente, ocorre a drenagem da solução com urânio para os tubos perfurados, no qual é coletada e movida para um sistema de troca iônica. O sistema de troca iônica extrai e concentra o urânio para produzir o yellowcake [10].

Por fim, o yellowcake é embalado e transportado para a instalação de conversão de urânio, no qual é processado através das etapas do ciclo do combustível nuclear a fim de produzir combustível para uso em reatores de energia nuclear [10].

Processo de recuperação da Pilha de Lixiviação

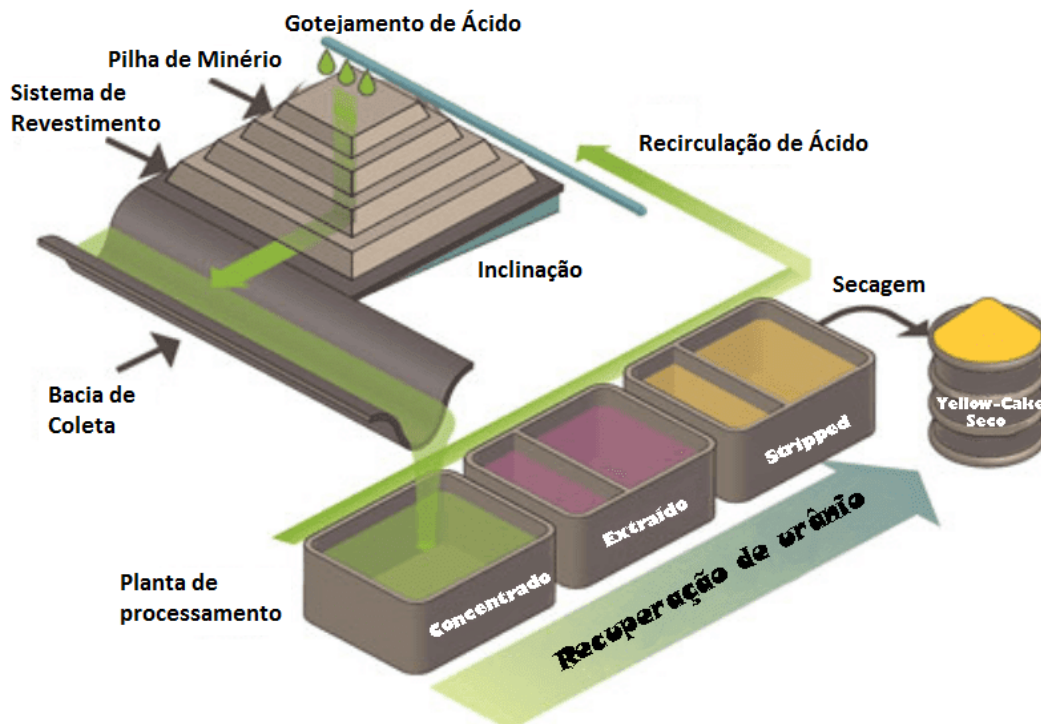


Figura 3.4: Detalhamento da lixiviação em pilhas [10]

3.2. Conversão

A conversão de urânio é um dos processos dos ciclos de combustível nuclear, no qual o urânio é quimicamente purificado e convertido na forma química de hexafluoreto de urânio (UF_6), o insumo para a maioria das instalações comerciais de enriquecimento de urânio. A maioria dos processos comerciais de enriquecimento de urânio (difusão gasosa e método de centrifugação de gás) exige que o urânio esteja na forma gasosa. Portanto, o concentrado de óxido de urânio deve primeiro ser convertido em hexafluoreto de urânio, um gás a temperaturas relativamente baixas. À pressão atmosférica, o hexafluoreto de urânio sublima a $56,5\text{ }^\circ\text{C}$. Nesta fase do ciclo, o produto de conversão do hexafluoreto de urânio ainda possui a mistura isotópica natural, ou seja, contém apenas 0,71% do isótopo fissil ^{235}U . No processo de enriquecimento, o hexafluoreto de urânio gasoso é separado em duas correntes, sendo uma delas enriquecida até o nível requerido e conhecida como urânio de baixo enriquecimento; o outro fluxo é progressivamente esgotado em urânio-235 e é chamado urânio empobrecido. Para temperaturas mais baixas, o hexafluoreto de urânio forma cristais cinzas sólidos em temperatura e pressão padrão, é altamente tóxico, reage com a água e é corrosivo para a maioria dos metais. Para o

transporte, ele será colocado em um contêiner especial e depois levado para a usina de enriquecimento. Sobre esse processo de conversão no Brasil, o país detém a tecnologia de conversão, mas não tem instalado uma unidade operacional [11] [12].

Para realizar esse processo, duas alternativas são utilizadas:

- Processo úmido
- Processo seco

O processo que é mais utilizado pelas principais empresas como Cameco no Canadá, Orano na França e Seversk na Rússia é o processo úmido. Esse processo dar-se início com a dissolução do yellowcake em ácido nítrico, o que resulta em uma solução de nitrato de urânio $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Essa solução é alimentada em um processo de extração por solvente em contracorrente, usando fosfato de tributil dissolvido em dodecano. Como resultado, é obtido o urânio por meio de um extrator orgânico e esse passará pelo processo de lavagem com uma solução diluída de ácido nítrico e pelo processo de concentração por evaporação. Por fim, há a calcinação dessa solução em um reator de leito fluidizado, produzindo o trióxido de urânio ou dióxido de urânio (se houver um aquecimento adequado). Com a obtenção desse óxido, há a redução e reação desse óxido de urânio com fluoreto de hidrogênio gasoso, formando tetrafluoreto de urânio, que ao ser colocado em um leito de reator fluideizado forma o hexafluoreto de urânio [11][12].

Comparando os dois processos, o mais comum nos EUA é por via seca. Nesse processo, há a calcinação e grande aquecimento dos concentrados de óxido de urânio com objetivo de extrair as impurezas. Como resultado, obtém-se o octóxido de urânio, que, por sua vez, é transformado em hexafluoreto de urânio [11].

3.3. Enriquecimento isotópico

O enriquecimento é um processo que busca aumentar a concentração do urânio para que seja possível utilizá-lo como combustível. Como resultado, o isótopo U-235 aumenta de 0,7% de concentração até 5%, o que é um nível adequado para produção de energia. O Brasil utiliza a técnica de ultracentrifugação, ilustrada abaixo, para fazer o enriquecimento e esse processo ocorre na Fábrica de Combustível Nuclear da INB em Resende (Rio de Janeiro) com enriquecimento de até 4% para fabricação de combustíveis para reatores de potência e no Centro Experimental da Marinha do Brasil com enriquecimento menor do de 20% utilizado para produção de elementos combustíveis para reatores de pesquisas [11] [12].

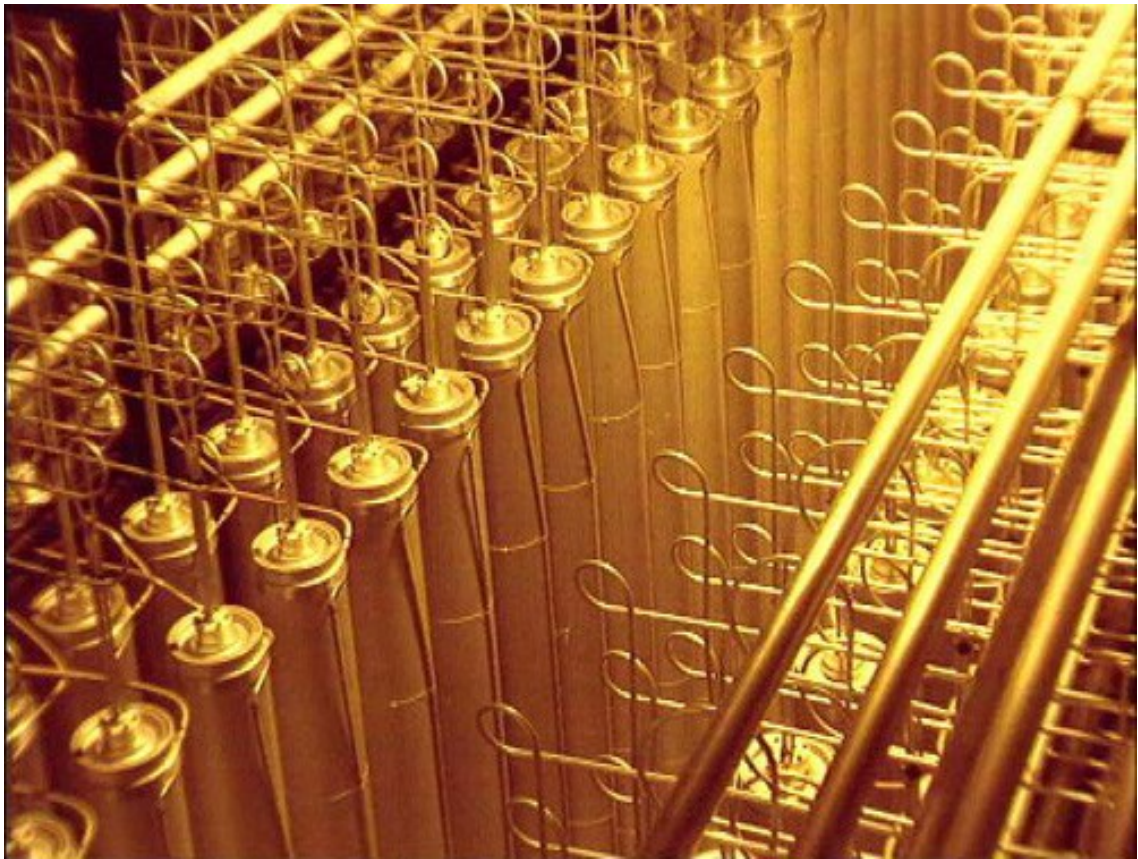


Figura 3.5: Processo de centrifugação, uma das técnicas de enriquecimento [11]

Na natureza, o urânio encontrado é uma mistura de três isótopos: U-234, U-235 e U-238, sendo que o U-235 é o principal isótopo físsil do urânio. A concentração do urânio natural contém 0,7% do isótopo U-235 e 99,3% são principalmente o isótopo U-238. Então, será necessário separar esses isótopos para que seja possível aumentar a concentração do urânio 235. Um fato relevante entre esses isótopos é que há uma pequena diferença de massa entre o U-235 e U-238, o que possibilita essa separação. Os reatores necessitam que a concentração de urânio

235 esteja entre 3 e 5%. Vale ressaltar que nesse processo de enriquecimento, o urânio deve estar em forma de gás a baixa temperatura [11] [12].

No mercado, há poucas empresas que fazem o enriquecimento, visto que esse processo é extremamente complexo e necessita de bastante investimento. Além desses dois fatores, é preciso que haja um acordo com a AIEA. Assim, há uma certa barreira tanto econômica quanto política de entrada para novos competidores [11] [12].

Embora 13 países com suas empresas tenham o domínio do processo de enriquecimento, cerca de 99% do enriquecimento se concentra em quatro empresas: Rosatom - Rússia (37,5%), CNNC – China (25,7%), Urenco – Alemanha/Reino Unido/Holanda (24,6%) e Orano – França (11,3%). Em sua maioria, as empresas optam por utilizar o processo de centrifugação do que a difusão, já que ele é mais eficiente e mais econômico. Vale destacar que, nesse processo, não é possível desligar as centrífugas, elas trabalham continuamente até o final da vida útil (25 anos) [11].

3.4. Reconversão

A reconversão faz o processo reverso da conversão, ou seja, o gás enriquecido na etapa anterior será convertido novamente em pó de dióxido de urânio. Como pode-se enxergar pela figura 3.6, o hexafluoreto de urânio inicialmente na forma gasosa se mistura a uma corrente pré-aquecida composta por gás carbônico e amônia e chega até um reator químico, onde haverá a reação do UF₆ com amônia, gás carbônico e água e terá como produto o tricarbonato de amônio e uranila (TCAU). Após a formação desse sólido, há a formação do dióxido de urânio por meio da decomposição térmica e redução do TCAU. Esse processo ocorre em um forno de leito fluidizado com hidrogênio e vapor d'água a 600 °C, o que proporciona essa redução química, formando dióxido de urânio. Ainda dentro desse forno, adiciona-se ao pó formado de dióxido de urânio, nitrogênio gasoso. Por fim, há o transporte deste para homogeneizadores, onde há a adição de octóxido de urânio, chegando-se na matéria prima da próxima etapa. No Brasil, essa etapa é feita na Fábrica de Combustível Nuclear da INB em Resende (Rio de Janeiro) [12].

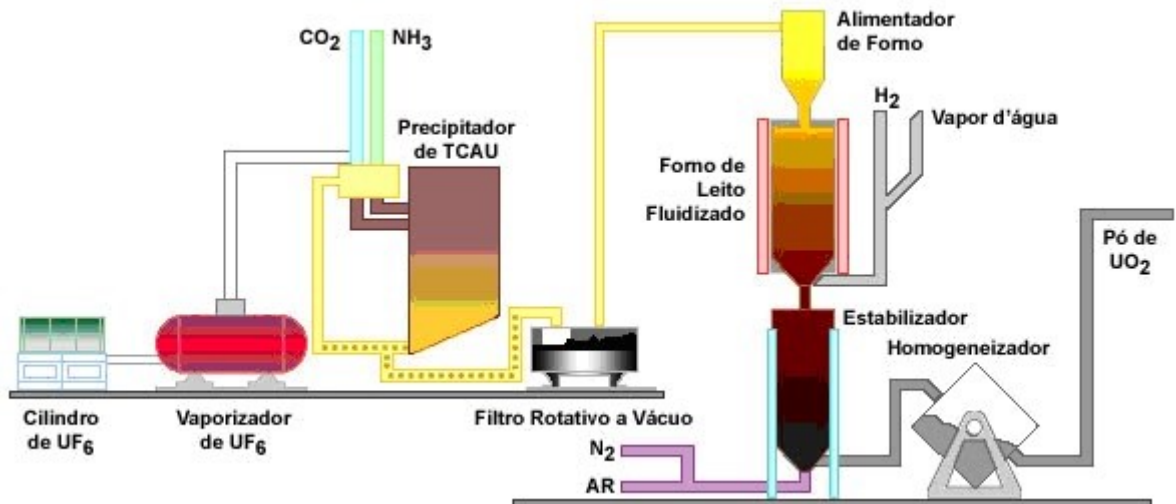


Figura 3.6: Fluxograma do processo de reconversão [13]

3.5. Fabricação de pastilhas

A fabricação de pastilhas consiste em transformar o urânio enriquecido sob a forma de pó da última etapa em pastilhas com cerca de um centímetro de diâmetro, mostrada pela figura 3.7. Para chegar nesse resultado, esse pó de dióxido de urânio pode passar por dois processos adicionais antes da transformação em pastilhas. Assim, pode haver a homogeneização para que haja a uniformidade da distribuição de tamanho de partícula e área de superfície específica e também pode ser adicionados aditivos como octóxido de urânio, lubrificantes e absorventes queimáveis para que haja a microestrutura e densidade adequada para as pastilhas [14] [15].



Figura 3.7: Resultado da fabricação de pastilhas - pellets de urânio [14]

Durante o processo de transformação em pastilhas, o pó passará, inicialmente, pelo processo de prensagem na forma de pellet cilíndrico, utilizando máquinas de prensagem que operam em velocidade muito alta. Após esse processo, o resultado disso são pastilhas 'verdes' que passarão por um processo de sinterização por aquecimento sob uma atmosfera redutora precisamente controlada para que haja a consolidação e diminuição do volume desses pellets. Por fim, haverá o processo de retificação desses pellets para que estejam com as dimensões exatas. Portanto, chega-se na matéria prima final que são diversos pellets com cerca de um centímetro de diâmetro. Para efeito de comparação, vale ressaltar que um único pellet tem a capacidade de produzir dentro de um reator a mesma quantidade de energia que uma tonelada de carvão. No Brasil, essa etapa é feita na Fábrica de Combustível Nuclear da INB em Resende (Rio de Janeiro) [15].

3.6. Fabricação de elementos combustíveis

O processo de fabricação do combustível nuclear consiste em colocar esses pellets obtidos na última etapa dentro de varetas de uma liga de zircaloy. Essas varetas são organizadas em feixes, o que forma uma estrutura de até 5 metros de altura denominada como combustível nuclear. Especificando um pouco mais sobre o projeto de um reator nuclear, haverá, dentro do reator, estruturas físicas que seguram as barras de combustível e essas devem resistir a diferentes aspectos como corrosão química, altas temperaturas, cargas estáticas, vibração constante, fluidos e impactos mecânicos. Essas estruturas físicas estarão em contato com uma estrutura de aço e zircônio que dentro contém o combustível. Em torno do combustível, há o suporte de grade feito à base de uma liga de zircônio que tem a função de manter precisamente as hastes nas posições de treliça para que haja o fluxo de água de refrigeração ao redor da haste de combustível. O formato final dessa estrutura é visto pela figura 3.8 [15].



Figura 3.8: Estrutura com varetas que englobam os pellets de urânio [16]

Durante o processo, as pastilhas são colocadas em tubos de revestimento feitos à base de uma liga de zircônio. Assim, esse tubo contendo os pellets é pressurizado com hélio antes da soldagem das extremidades do tubo. Nesses tubos, sempre é deixado um espaço denominado como plenum que consiste no espaço livre entre os pellets e o topo do tubo e isso é feito por conta da expansão térmica dos pellets e acomodação de alguns produtos gasosos da fissão. Geralmente, é colocado uma mola no plenum para que haja uma força de compressão na pilha de pellets, evitando seu movimento. A fabricação de combustível nuclear no Brasil ocorre na Fábrica de Combustível Nuclear da INB em Resende (Rio de Janeiro) [15] [16].

3.7. Geração de energia

A geração de energia é o objetivo principal de todo esse ciclo do urânio. Dentro do reator nuclear, haverá a fissão dos átomos de urânio que estão presentes no combustível nuclear, o que gera uma grande quantidade de calor e, por consequência, aquece a água, fazendo com que essa água em forma de vapor movimente turbinas, gerando energia. Esse fluxograma pode ser enxergado pela figura 3.9 [17].

Entrando mais no detalhe de como funciona um reator nuclear, esse reator é composto por algumas partes: combustível, moderador, hastes de controle, refrigerantes, tubos de pressão, gerador de vapor e sistema de contenção [17][18].

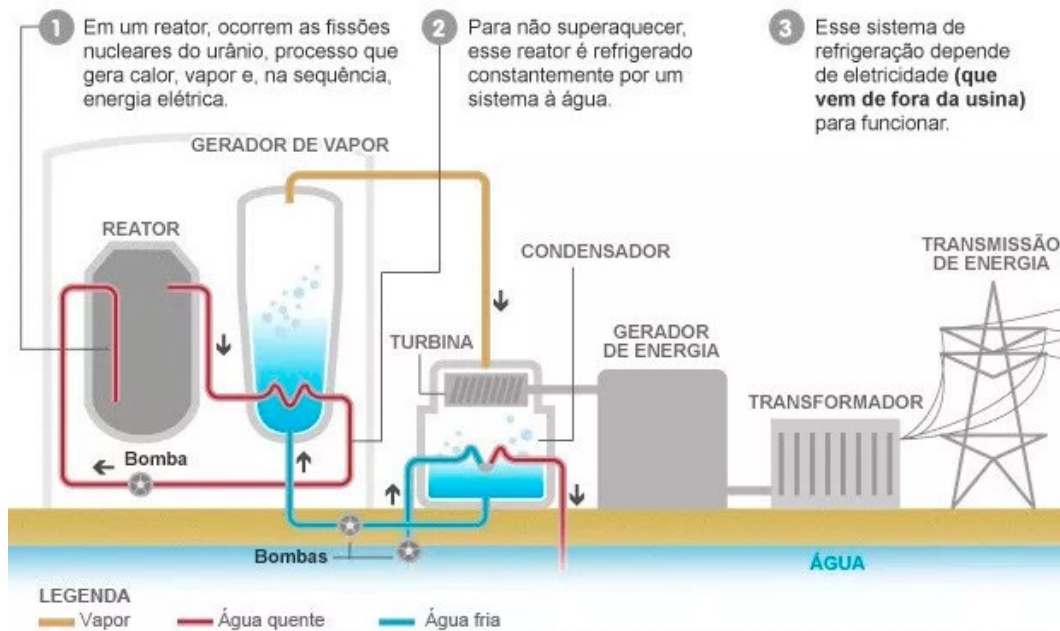


Figura 3.9: Fluxograma de um reator nuclear para geração de energia [17]

A parte principal é o combustível que é composto por diversos tubos contendo os pellets de óxido de urânio. Para dar suporte e manter os tubos nas posições corretas, há hastes de controle que se encontram no núcleo do reator. Para ter uma magnitude da quantidade de hastes utilizadas, em um PWR pode ter mais de 50 mil hastes de combustível com mais de 18 milhões de pellets. Ainda no núcleo do reator, há um material denominado como moderador que é capaz de controlar os nêutrons liberados da fissão para que haja uma fissão ainda maior e produza mais energia. Esse moderador geralmente é água, mas em alguns casos pode ser água pesada ou grafite [18].

Além disso, se encontram também no núcleo hastes de controle feitas de um material absorvente de nêutrons, como cádmio, háfnio ou boro, e possuem a função de controle da velocidade da reação. Ao redor desse núcleo, há um fluido que circula para que haja o controle da temperatura do reator, visto que é necessário dissipação de calor para que o reator não derreta. Para regular a pressão desse sistema, há uma estrutura de aço robusto que engloba o núcleo do reator, o moderador e refrigerante, o qual é denominado de recipiente de pressão ou tubos de pressão [18].

Outra parte relevante do reator nuclear é o gerador de vapor, que consiste em um sistema de resfriamento de reatores de água pressurizada. O refrigerante primário de alta pressão possui a função de levar o calor produzido no núcleo para produzir vapor e movimentar a turbina, em um circuito secundário [18].

No Brasil, a geração de energia é realizada nas usinas nucleares de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro. Vale ressaltar que, após o uso dos elementos combustíveis, esses podem ser armazenados em racks instalados dentro da piscina. Essas piscinas possuem um trocador de calor para remover o calor dos combustíveis armazenados e também uma camada de cerca de 7 metros de água borada para diminuir os níveis de radiação. Depois de alguns anos, esse elemento combustível é retirado da piscina e armazenado em locais que se encontram perto da usina, como ilustrado pela figura 3.10. Outra alternativa é o reprocessamento que consiste em extrair materiais físeis para reciclar e reduzir o volume de resíduos de alto nível. Esse processo não pode ser realizado por qualquer país, já que ele necessita de uma tecnologia muito avançada e é possível confeccionar armas nucleares. Assim, há um grande jogo político por trás dessa técnica de reprocessamento [18] [19].



Figura 3.10: Armazenamento de combustíveis usados [19]

4. CARACTERÍSTICAS DA ENERGIA NUCLEAR

O aumento da demanda de eletricidade está relacionado ao desenvolvimento da economia e à elevação do padrão de vida em cada país. Isso é especialmente verdadeiro para os países em desenvolvimento, onde o consumo de eletricidade está muito abaixo do consumo médio de eletricidade nos países industrializados.

Para satisfazer o aumento da procura é necessário construir novas centrais eléctricas, que possam, de forma óptima, cumprir os critérios de aceitabilidade impostos. Os principais critérios são o potencial para fornecer a energia necessária, fornece essa energia com custos mínimos (ou pelo menos aceitáveis), satisfazer os requisitos de licenciamento e ser aceitável para o público. Os principais concorrentes para a produção ilimitada de eletricidade nas próximas décadas são as usinas de energia fóssil (carvão e gás) e as usinas nucleares. Novas usinas de energia renovável (solar, eólica, biomassa) também são importantes, mas devido ao potencial limitado de fornecimento de energia e aos altos custos, só podem ser complementadas pelas principais unidades geradoras. As grandes usinas hidrelétricas seriam competitivas desde que existissem locais adequados para a construção de tais usinas [20] [21] [22].

A energia nuclear se caracteriza por ter custos de produção elevados. Esses custos podem ser separados em três principais categorias: de capital, de operação e manutenção e de combustível. Cada termo de custo tem uma certa margem de incerteza, que deve ser prevista usando a abordagem da melhor estimativa. O problema a ser considerado é como definir a distribuição de incerteza dos custos de eletricidade calculados levando em consideração essas margens de incerteza. O uso de valores aleatórios de cada item de custo no cálculo dentro de um determinado quadro de incerteza (o método de Monte Carlo) resolve o problema. Grande número de cálculos para obter o resultado requer o uso de um código de computador adequado [20] [21] [22].

O custo de capital das usinas nucleares é geralmente muito alto, já que a obra e a montagem eletromecânica são de alta complexidade, o que pode resultar facilmente em revisões de orçamento [20] [21] [22].

Em relação ao custo de combustível, as usinas nucleares se caracterizaram pelos baixos gastos em combustível comparado com outras usinas a combustíveis fósseis. Os valores giram em torno de 10 a 15% do custo unitário de geração. Além disso, o Brasil possui diversas reservas

de urânio e, com isso, o preço do combustível será baixo e estável, ou seja, não estará sujeito a pressões externas [20].

Nestes reatores, o fator de capacidade é maior que 90%, isso possibilita operar em alta potência, sendo que as máquinas só são desligadas no caso de manutenção ou recarga. Portanto, as despesas de operação e manutenção são baixas. Em compensação, ao se comparar a produtividade da energia nuclear com outras formas de gerar energia, o fator de capacidade (razão entre energia produzida e capacidade nominal) nos reatores brasileiros é próximo de 0,88 para a nuclear, enquanto as outras giram em torno de 0,50. Além disso, a energia gerada é muito maior, apesar de um prazo de construção maior que as outras formas [21].

Outro benefício da energia nuclear é o impacto que essa fonte de energia possui. No processo de obtenção de energia, não são gerados gases poluentes, fato que acontece em quase todos os processos de obtenção de energia. Vale destacar que, na extração do urânio, é gerado gases [22].

Resumindo, o que acaba encarecendo a operação dos reatores nucleares é a parte do custo de capital (custo fixo) e o foco dos pesquisadores, atualmente, é na redução desse valor, a fim de tornar tais reatores mais eficientes e econômicos. Um exemplo disso é o custo de investimento de um reator tipo AP1000 estima-se que é entre 1000 a 1200 US/kW(e), custo este equivalente às térmicas convencionais [20].

4.1. Riscos de Utilização

Um dos principais riscos de utilização dessa energia é o resíduo gerado, denominado rejeito nuclear. Esse rejeito pode ser motivo de preocupação para o ser humano, já que o possível acesso aos estoques do combustível nuclear ou até esse rejeito nuclear, pode gerar um comércio clandestino perigoso. Além disso, os acidentes são bastante lembrados como episódios traumáticos para a sociedade, como aconteceu em Fukushima, ilustrado pela figura 4.1. Sob esse aspecto, a insegurança nuclear existe e esse medo está presente na consciência dos cidadãos [22].

Outro receio é a bomba nuclear. Tais bombas são umas das armas com maior poder de destruição e podem causar diversos efeitos durante anos após a sua detonação. A bomba causa a morte de 50 a 90% das pessoas que estão em um raio de 1,2 km do ponto de detonação. O problema pode ser ainda maior, uma vez que diversos problemas à saúde humana podem ser constatados em indivíduos próximo à região, como cicatrizes de graus muito elevados, mortes por causa da exposição à radiação ou até surgimento de mutações genéticas [22] [23] [24].



Figura 4.1: Explosão envolvendo o acidente nuclear em Fukushima [23]

Por outro lado, a energia nuclear é considerada mais segura do que os outros modos de se obter energia tanto no aspecto de poluição do ar quanto na segurança do trabalhador. Um exemplo disso é a morte de mais de 500 pessoas em acidentes na indústria europeia de carvão, petróleo e gás [24][22].

Como consequência da geração de energia, o rejeito nuclear é o impacto ambiental mais discutido. Esses rejeitos são depositados em tambores nas regiões mais próximas às usinas. Por conta de sua toxicidade, eles necessitam de uma atenção especial na hora de armazenar, uma vez que esse material permanecerá nos depósitos por tempo indeterminado. Em média, uma usina nuclear produz 800 toneladas de rejeitos radioativos. Comparado às usinas a carvão, que tem de rejeitos 500 mil toneladas, esses números se tornam relativamente pequenos [25].

Além do cuidado no armazenamento desses rejeitos, há alguns problemas considerados como principais críticas a essa energia:

- Aquecimento das águas: no processo de resfriamento do reator nuclear, é utilizado a água do mar como fonte de resfriamento e também para movimentar as turbinas. Após a utilização dessa água, essa volta ao ambiente com uma temperatura ainda maior da qual ela foi extraída, o que pode provocar danos para a fauna e flora marinha [21] [22].
- Risco de uma possível contaminação causada pelos rejeitos nucleares: qualquer vazamento por esses rejeitos pode gerar contaminação que são extremamente nocivos ao meio ambiente. Quando não havia um procedimento para o descarte correto desse material, esses rejeitos eram descartados no mar ou colocados em minas ou cavernas, o que acabou gerando um grande desequilíbrio nesses ecossistemas [21] [22].
- Risco de acidentes e vazamentos: apesar de um nível de controle sobre as condições dos reatores nucleares, há sempre riscos de vazamentos e acidentes, fato que aconteceu em Chernobyl e em Fukushima, que geraram enorme prejuízo tanto ao meio ambiente quanto aos trabalhadores das usinas expostos a tais radiações [21] [24].

Considerando todos esses riscos, o controle para evitar qualquer tipo de vazamento ou acidente é essencial, já que a contaminação radioativa pode ocasionar diversos prejuízos ao meio ambiente como mutações genéticas de espécies de plantas, insetos e animais, queimaduras e surgimento de diversas doenças (câncer) [21].

4.2. Bombas Nucleares

A bomba atômica é uma arma nuclear com grande potencial explosivo e resultante da liberação repentina de energia. Essa liberação é derivada da fissão dos núcleos de um elemento pesado, como o urânio [24].

No momento em que um nêutron atinge o núcleo de um átomo dos isótopos urânio-235, ocorre a divisão do núcleo em dois fragmentos, contendo em cada um deles um novo núcleo com cerca da metade de prótons e nêutrons do núcleo original. Nesse processo de divisão, uma vasta quantidade de energia térmica é liberada, além de raios gama e cerca de dois nêutrons. Perante certas condições, os nêutrons liberados atingem outros núcleos de urânio, causando suas respectivas divisões e liberando mais nêutrons que dividem cada vez mais núcleos. Dessa

forma, essa série de fissões que se ampliam velozmente resulta em uma reação em cadeia, no qual é gerada a explosão com quase todo o material físsil consumido [24].

Durante a Segunda Guerra Mundial, sob um programa chamado Projeto Manhattan, a primeira bomba atômica foi construída, em Los Alamos, onde se localizava o principal laboratório científico da bomba atômica. Em 1945, foi testada com sucesso uma bomba utilizando plutônio [24].

A primeira bomba atômica utilizada durante a guerra era composta de urânio. Esta foi lançada pelos Estados Unidos no Japão, na cidade de Hiroshima, em 1945. Com força de mais de quinze mil toneladas de TNT, cerca de setenta mil pessoas foram mortas imediatamente e, ao decorrer do ano, o número chegou a ultrapassar cem mil mortos. Além disso, mais de 77% das estruturas da cidade foram destruídas. A magnitude dessa explosão pode ser enxergada na figura 4.2 abaixo [24].

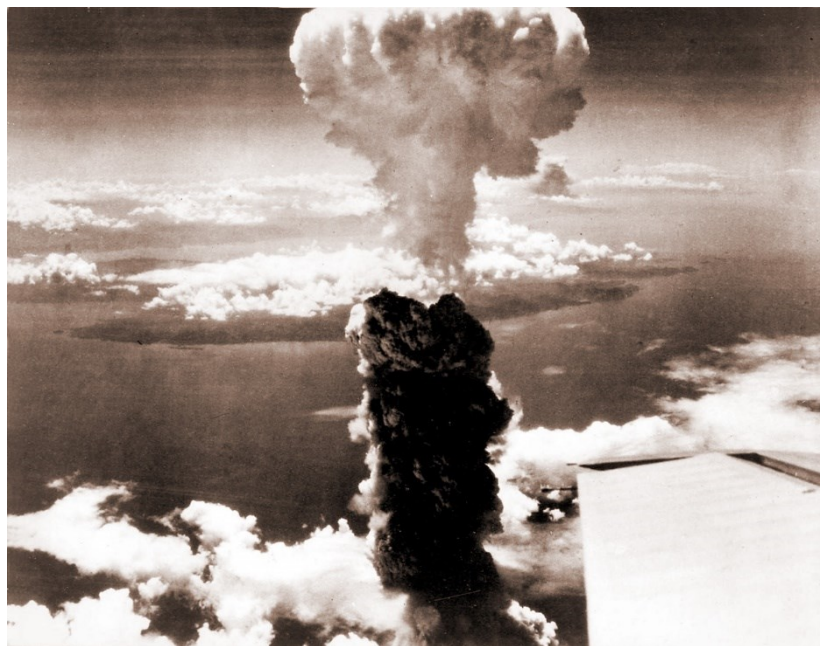


Figura 4.2: Momento da explosão da bomba atômica de Hiroshima [24]

5. MERCADO

Para analisar o mercado de urânio, deve-se estimar, principalmente, dois fatores que influenciam no preço: oferta e demanda. Na literatura, os trabalhos buscam identificar as tendências desses dois parâmetros para ter uma projeção confiável da perspectiva do urânio [26] [27].

Assim, é preciso avaliar como essas duas variáveis se comportam nas diferentes regiões do mundo para fornecer uma projeção futura.

5.1. América do Sul

Na América do Sul, o destaque é do Brasil que possui uma das maiores reservas de urânio (7ª maior reserva de urânio já descoberta) e, em operação, está com dois reatores nucleares. No lado da demanda, a Argentina também aparece com 3 reatores em funcionamento. Mas, em geral, comparado as outras regiões, a América do Sul está muito atrás no lado de utilização de reatores nucleares, representando apenas 1% dos reatores em funcionamento no mundo. Em relação à oferta de urânio, a América do Sul surge como uma das candidatas a ser líder, já que países como Brasil, Chile exploram pouco ainda essa commodity e, mesmo assim, Brasil está no top 10 de reservas conhecidas de urânio [28][2].

5.1.1. *Brasil*

- **Demanda**

No lado da demanda, o Brasil possui apenas uma usina nuclear localizada no Rio de Janeiro, especificamente em Angra. Essa usina é composta por dois reatores nucleares, que somam uma capacidade de 2006 MWe. Ainda nessa unidade, está sendo construído desde 2010 um terceiro reator nuclear, mas, por conta de corrupção, a obra foi suspensa. Apenas, em julho de 2021, um consórcio (Ferreira Guedes, Matricial e ADtranz) assumiu para finalizar a obra. Nos próximos anos, bem provável dessa obra estar pronta [28].

Em relação a parte de energia, a matriz energética do Brasil é dependente de hidrelétricas que produzem cerca de 80% da eletricidade consumida no país. Mas, nos últimos anos, houve diversos períodos de secas e essa relevância da hidrelétrica perdeu uma parte de espaço. Sobre

a energia nuclear, essa representa apenas 3% da eletricidade consumida, mas, nesse ano, foram iniciados estudos para determinar a localização das próximas usinas nucleares [28].

- **Oferta**

No Brasil, existiram três depósitos de urânio: na cidade de Poços de Caldas em Minas Gerais, na cidade de Lagoa Real na Bahia e Santa Quitéria no Ceará. Porém, apenas a mina na Cidade de Lagoa Real está em operação, visto que Poços de Caldas foi encerrado e Santa Quitéria deve iniciar as operações nos próximos anos [3] [28].

A mina de poços de caldas foi a primeira mina de urânio no país e essa iniciou em 1982, no município de Caldas. Estima-se que no período que esteve ativa, ou seja, entre 1982 e 1995, houve a produção de mil toneladas de concentrado de urânio. Em 1995, a mina deixou de existir devido a uma decisão da INB de que esta não era mais economicamente viável. Em 2005, houve o início da descontaminação das instalações e terrenos. Atualmente, a mina deu lugar a um lago com águas ácidas e há uma constante monitoração das instalações, solo, águas e equipamentos da antiga mineração, além dos materiais radioativos estocados [3].



Figura 5.1: Localização da antiga mina de Poços de Caldas [29]

Atualmente, a única mina ativa no Brasil se encontra na Bahia próximo a Caetité. Nesse local, há mais de 100 mil toneladas de urânio e cerca de 38 anomalias, ou seja, áreas com uma grande concentração de urânio. Por causa disso, muitos denominam essa região de Província

Uranífera. Essa mina produz ao ano cerca de 400 toneladas de urânio. Esse Distrito Uranífero foi encontrado entre 1976 e 1977, sendo identificados inicialmente 19 áreas mineralizadas. A conclusão do projeto da mina foi em 1996 e a produção atende toda a necessidade de Angra 1 e 2. A INB tem como objetivo realizar a extração subterrânea do minério de urânio [30] [3].



Figura 5.2: Mina em exploração na cidade de Lagoa Real [31]

A mina de Santa Quitéria localizada no Ceará ainda não está em operação, mas a perspectiva é que nos próximos anos produza cerca de 79,3 mil toneladas de octóxido de triurânio. Essa jazida possui reservas geológicas de 142,5 mil toneladas de urânio associado ao fosfato, sendo que os teores são de 998 ppm de octóxido de triurânio. Além disso, há uma grande reserva de mármore. Embora seja a maior reserva de urânio que o país possui, houve o interrompimento das obras dessa mina por um longo tempo devido às denúncias feitas pelos moradores da região sobre as seguintes questões: vazamentos de material radioativo, acidentes, contaminação de terra e de lençóis freáticos, adoecimento da população e falta de transparência da estatal responsável pelo projeto. Esses pontos impediram que a obra tivesse licenciamento ambiental até que, no governo de Jair Bolsonaro, houve a flexibilização do licenciamento ambiental para diversas obras como essa em Santa Quitéria. Outra questão que pode ser abordada é a viabilidade econômica desse projeto, visto que depende muito se é viável a

exploração do fosfato associado ao minério de urânio. A INB fez a licitação dessa mina em 2008 para a empresa Galvani explorar [32][3].



Figura 5.3: Local da mina ainda não explorada de Santa Quitéria [33]

5.2. América do Norte

Essa região é um dos destaques para a energia nuclear, visto que possui uma das maiores reservas de urânio e utilizam, em grande escala, reatores nucleares para a geração de energia. No lado da oferta, o Canadá é o país que se destaca, já que ele possui a terceira maior reserva de urânio do mundo e tem a maior mina de urânio do mundo (representa 10% do urânio mundial). No lado da demanda, os Estados Unidos se sobressaem com 92 reatores em operação, representando 20% da geração da eletricidade [28] [34].

- **Oferta**

Do ponto de vista da oferta, o principal destaque é o Canadá que foi, por muitos anos, o maior produtor mundial de urânio, representando 22% da produção mundial. Apenas, em 2009, o país foi ultrapassado pelo Cazaquistão e, agora, se situa na terceira posição. Apesar disso, o país lidera como o país com maior reserva de urânio [35][28].

A produção no Canadá é proveniente, principalmente, das minas de McArthur River e Cigar Lake, que se configuram como as maiores minas e de maior teor do mundo (cerca de 100 vezes a média mundial). De toda a produção do país, mais de 85% é exportada para outros parceiros comerciais. Os principais produtores de urânio no Canadá são as principais empresas do ramo de urânio: Cameco e Orano [35][28].

- **Demanda**

Na América do Norte, o grande destaque é dos EUA que possui 92 reatores nucleares em operação, que totalizam uma capacidade de gerar 94,7 GWe. Para ter como base, esses reatores produziram, em 2021, o equivalente a 19,6% da eletricidade do país. Nos próximos anos, são poucos os projetos destinados a reatores nucleares e isso é justificado pela evolução da manutenção dos reatores existentes, que aumentou a produtividade dos reatores. Com esses ganhos de eficiência, houve um aumento de eletricidade gerada comparável ao equivalente a 19 novas usinas de 1.000 MWe. No gráfico abaixo, pode-se notar esse ganho de eficiência [28].

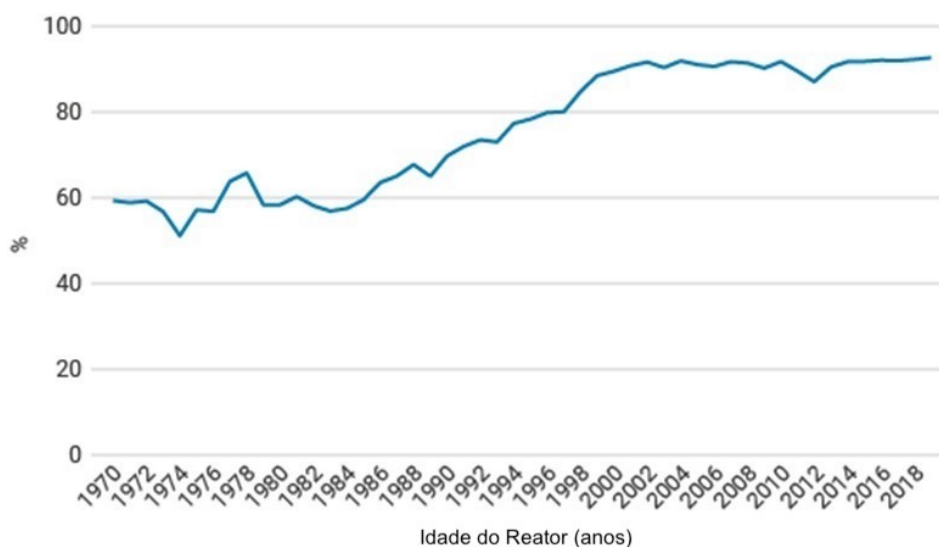


Figura 5.4: Evolução do fator capacidade nos EUA durante os anos [36]

Outros países que vale mencionar são o Canadá e o México. O primeiro possui, atualmente, 19 reatores nucleares em operação e eles representam 14,3% da eletricidade do país. Além disso, o Canadá é referência em pesquisa e desenvolvimento de reatores de pesquisas. O segundo ainda tem poucos reatores em operação, cerca de dois, totalizando 5,3% da eletricidade do país [35][28].

5.3. Europa

- **Oferta**

Do lado da oferta, o destaque fica para Rússia e Ucrânia. A Rússia é um dos países que mais investe na mineração de urânio, com cerca de 9% dos recursos razoavelmente garantidos do mundo. Para contextualizar, a Rosatom, corporação estatal russa, comanda todas as atividades nucleares. Assim, essa empresa possui diversas subsidiárias, sendo que as mais importantes a serem destacadas são: ARMZ (consolida toda a parte de mineração dentro da Rússia), Uranium One (empresa de mineração global que possui ativos no Cazaquistão, EUA e Tanzânia), TVEL (consolida toda a parte do ciclo do combustível) e TENEX (exportadora de urânio enriquecido e fornecedora de produtos do ciclo do combustível nuclear) [37].

Destrinchando os números dessas empresas, em 2021, a ARMZ produziu 2.635 toneladas de urânio e a Uranium One produziu 4.514 toneladas de urânio. Somando esses números, a mineração sob o controle da Rosatom equivale a 14% da produção mundial, só atrás da Kazatomprom (corporação estatal do Cazaquistão). Em relação a TVEL, além de satisfazer plenamente as necessidades de combustível nuclear de todas as usinas nucleares russas, fornece também combustível nuclear para outros 14 países. Assim, o combustível nuclear russo está em 78 de um total de 440 reatores de energia operados em 15 de um total de 30 países. Por último, a TENEX fornece serviços de enriquecimento de urânio para mais de 30 concessionárias em 16 países. Em resumo, a Rosatom possui uma participação de 36% no mercado de serviços globais de enriquecimento de urânio [37].

A Ucrânia também possui mineração de urânio, mas, em uma escala bem menor, somando um total de 186.000 toneladas de urânio. Quase a totalidade desses recursos advém da Bacia Dniprovski do Escudo Ucraniano. O país é extremamente dependente da Rússia, no sentido que o concentrado de urânio ucraniano e liga de zircônio são enviados à Rússia para fabricação de combustível e, posteriormente, retorna para utilização nas usinas nucleares ucranianas [38].

- **Demanda**

Na Europa ocidental, há diversos países que são referência em energia nuclear como: França, Finlândia, Suécia, Suíça e Bélgica. Nesses países, os reatores nucleares representam mais de 30% da eletricidade consumida. Em se tratando de França, esse é o país com mais reatores nucleares em operação na Europa, produzindo aproximadamente 2/3 da eletricidade do país. Porém, nesses últimos anos, vem sendo discutido a diminuição da geração nuclear e alguns

países estabeleceram metas. A França tinha estabelecido de reduzir para 50% até 2025, porém essa meta agora foi adiada para 2035. Outro país que estava caminhando para essa direção era a Alemanha que tinha como meta eliminar a geração nuclear até o final de 2022, mas a guerra entre Rússia e Ucrânia afetou essa meta [37].

Na Europa central e oriental, o grande destaque fica para Rússia, com 37 reatores nucleares em operação. Em 2016, o governo russo estabeleceu como meta estimular o setor nuclear com a construção de 11 reatores nucleares até 2030. Em 2022, três reatores já estão em construção. Mas a Rússia não se limita em estimular a indústria nuclear dentro do próprio país, ela está exportando novos reatores em novos projetos na Bielorrússia, China, Hungria, Índia, Irã e Turquia, e está sendo investidor na Argélia, Bangladesh, Bolívia, Indonésia, Jordânia, Cazaquistão, Nigéria, África do Sul, Tajiquistão e Uzbequistão, entre outros. Assim, esse país é uma grande referência ao setor. Outro país que vale destaque é a Ucrânia que possui 15 reatores nucleares em operação e alguns órgãos mundiais estão preocupados com a segurança deles devido a guerra que está ocorrendo na região [37].

5.4. Ásia

- **Oferta**

O Cazaquistão é o maior produtor mundial de urânio, com cerca de 45% da produção mundial e 15% dos recursos mundiais de urânio. Como era um dos países constituintes da antiga URSS, o Cazaquistão era uma parte importante do complexo nuclear e possuía capacidades significativas do ciclo nuclear. Na época, o Cazaquistão era a principal região produtora e o principal produtor de pellets de combustível. Antes do colapso da União Soviética, estima-se que mais de 70 mil toneladas de urânio foram extraídas e 80% dos pellets usados pela URSS eram provenientes do Cazaquistão. Nos anos 70 e 80, foram encontrados grandes depósitos de urânio no país e como possuía uma grande expertise da época da União Soviética continuou sua exploração dos depósitos e se tornou um dos principais produtores de urânio, com um dos menores preços e pouco impacto ambiental. No país, há 13 projetos de mineração de urânio do Cazaquistão, sendo que três são de propriedade total da Kazatomprom (corporação estatal do Cazaquistão) e 10 são joint ventures com acionistas estrangeiros. Em 2020, a participação da produção da Kazatomprom foi de 10.736 tU, colocando-a à frente de Orano, Cameco e Uranium One [39].

Além do Cazaquistão, outro país que era também uma fonte significativa de suprimento de urânio russo era o Uzbequistão. Atualmente, o NMMC (Navoi Mining and Metallurgy Combinat, empresa estatal uzbeques envolvidas na indústria de mineração) informou em setembro de 2020 que a produção estava em torno de 3.500 toneladas de urânio, mas, historicamente, o país sempre manteve as informações de produção confidenciais. A extração de urânio ocorre no centro do país, com Navoi como centro, ligada às minas por ferrovia. Essa região possui um cinturão de urânio de 125 km de largura que se estende por uma distância de cerca de 400 km envolvendo desde o Noroeste até o Sudeste [40].

Em relação a outros países da região que são emergentes na mineração de urânio, a China tem muito recurso de urânio a ser explorado. Segundo o país, os recursos estimados são em torno de dois milhões de toneladas de urânio, mas, os números publicados são de 366.000 tU. A justificativa dessa diferença é que há descobertas no norte e noroeste da China que aumentaram essas expectativas em relação aos recursos de urânio. Outro país que vale mencionar é a Índia, mas, por enquanto, os recursos não são relevantes, com apenas 183.600 toneladas de urânio de recursos identificados. Assim, a Índia pode se tornar um grande importador de combustível de urânio dado que os recursos de urânio não são tão grandes [28].

- **Demanda**

Nesses últimos anos, a Ásia é responsável pela maioria dos projetos envolvendo reatores nucleares devido ao custo benefício de um reator nuclear para regiões muito populosas. Por exemplo, a China possui 54 reatores nucleares em operação, que representa 5,0% da eletricidade do país. Nesse ano, estavam agendados mais 21 reatores para serem concluídos. No caso específico de China, o forte impulso para o desenvolvimento de uma nova energia nuclear é principalmente por causa da necessidade de melhorar a qualidade do ar urbano e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Outra grande potência da Ásia é a Índia com 22 reatores nucleares em operação, totalizando 3% da eletricidade do país. O governo indiano também está comprometido em aumentar sua capacidade de energia nuclear como parte de seu enorme programa de desenvolvimento de infraestrutura. Em 2010, a meta do governo é ter 14,6 GWe de capacidade nuclear online até 2024. Atualmente, há oito reatores em construção [41][28].

Um caso mais interessante a ser analisado é o Japão, que após o acidente de Fukushima, sofreu uma grande queda de reatores e quantidade de eletricidade advinda de reatores nucleares. Atualmente, há 33 reatores nucleares em operação, mas, desde 2011, apenas 10 reatores de 25

reatores foram colocados novamente em operação. Em 2011, 30% da eletricidade do país veio da energia nuclear e, em 2021, o número era de apenas 7,2% [42].

Outro país que vale o destaque é a Coreia do Sul que possui 25 reatores em operação. Esses reatores fornecem cerca de um terço da eletricidade. Em março de 2022, o novo presidente eleito rejeitou a política de eliminação progressiva da energia nuclear e mostrou comprometimento em aumentar o investimento na indústria nuclear. A nova administração quer ter mais 10 novas usinas nucleares no exterior até 2030. Em abril desse ano, o KHNP (Korea Hydro & Nuclear Power) apresentou uma oferta à Polónia para a construção de seis reatores APR-1400 [28].

5.5. África

- **Oferta**

A Namíbia é a segunda maior produtora de urânio do mundo e existem dois tipos principais materiais que são explorados para encontrar urânio: o granito de cor clara, denominado como alaskita presente nas regiões de Rössing e Husab e o calcrete, localizado na região de Langer Heinrich. O mineral de urânio predominante na alaskita é a uraninita e no calcrete é a carnotita. Ambos os tipos de mineralização são passíveis de métodos de mineração a céu aberto. A mineração de urânio se tornou um fator econômico muito importante para o País, visto que criou diversas oportunidades de emprego na indústria de mineração e também na indústria de fornecimento e serviços [43].

O Níger tem duas minas de urânio significativas nas cidades de Arlit e Akokan, que produzem aproximadamente 5% da demanda mundial de minérios de urânio. A primeira mina comercial de urânio do Níger começou a operar em 1971 e, desde então, há um forte apoio do governo para a expansão da mineração de urânio. Historicamente, essa exploração de Urânio está extremamente relacionada à Comissão Francesa de Energia Atômica e da Cogema, que atualmente se denomina Orano. Vale destacar que esse país é uma ex-colônia francesa, por isso, a influência da França na região é muito grande [28].

- **Demanda**

Do lado da África, a demanda ainda é muito baixa. Apenas, na África do Sul há uma única usina nuclear Koeberg, contendo dois reatores nucleares. Há planos de novos reatores nucleares, já que o Departamento de Recursos Minerais e Energia da África do Sul fez uma

proposta para ter 2500 MWe em novos reatores nucleares. A intenção é concluir esse processo de aquisição até 2024 [28].

5.6. Oceania

- **Oferta**

Desde 1954, há a extração de urânio na Austrália e três minas estão operando atualmente. Os recursos conhecidos de urânio da Austrália são os maiores do mundo, contemplando cerca de um terço do total mundial. Em 2019, a Austrália produziu 8 mil toneladas e o destino dessa produção é o exterior, visto que a Austrália não utiliza a energia nuclear devido à alta dependência do carvão para gerar energia [44].

- **Demanda**

Em relação a demanda, por enquanto não há nenhum reator nuclear localizado na Oceania. Mas, o principal candidato a ter no futuro é a Austrália, visto que o país possui uma infraestrutura significativa tanto por conta da Organização Australiana de Ciência e Tecnologia Nuclear (ANSTO) quanto pela indústria de mineração de urânio ser bem desenvolvida. Porém, o único motivo que alteraria a política energética da Austrália seria a redução das emissões de gás carbônico, já que o país conta com enormes recursos de carvão e de gás natural. Dessa forma, é bastante complicado competir com essa energia de baixo custo [44][28].

6. ANÁLISE DO MERCADO DE URÂNIO

6.1. Comportamento Histórico

A negociação do urânio é feita, na maioria das vezes, por meio de contratos a longo prazo, ou seja, as concessionárias compram seus produtos relacionados ao urânio por meio de um contrato longo negociado bilateralmente com fornecedores e, caso for necessário, negociam urânio no mercado spot. Assim, a liquidez do urânio no mercado spot não é grande, visto que não há quantidades significativas de negociações no mercado [45].

Analizando os padrões de preço do urânio nos últimos 20 anos mostrado pela figura 6.1, pode-se perceber que houve uma grande flutuação. Na imagem abaixo, é visto que os preços atingiram um máximo histórico em 2007 devido a inundação de uma das maiores minas de urânio na época (Cigar Lake Mine), o que provocou uma incerteza com a mineração de urânio, que desde 2003 era crescente. Em 2007, ainda é possível observar uma queda significativa na sequência justificado pelo surgimento de fontes alternativas de energia, como o gás de xisto nos EUA, e um movimento em direção ao subsídio de energias renováveis. Após essa queda, houve uma leve recuperação dos preços do urânio até o acidente de Fukushima em março de 2011. Esse evento proporcionou o fechamento de todos reatores em operação do Japão e a maioria na Alemanha. Além disso, o evento de Fukushima foi um dos responsáveis por um declínio de longo prazo nos preços do urânio, já que houve uma queda expressiva da demanda [46].

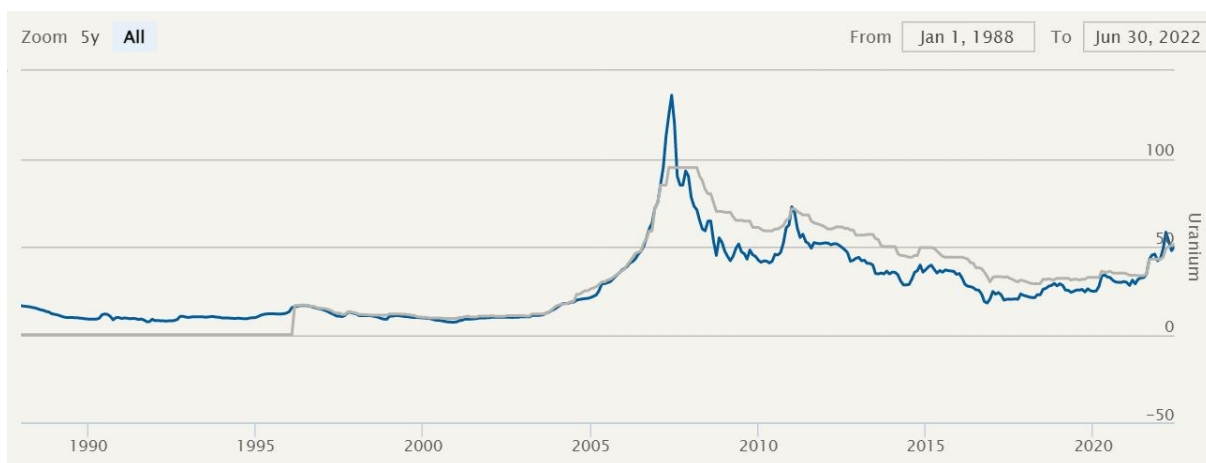


Figura 6.1: Comportamento do preço do urânio desde a década de 90 [45]

Apenas em 2017, o preço do urânio voltou a ter um retorno lento após o arrefecimento das pressões, a reconstituição das usinas no Japão e a construção de novos reatores na Ásia e

no Oriente Médio. Mas só foi no primeiro trimestre de 2022 que o preço se valorizou rapidamente devido à agitação no Cazaquistão junto às preocupações com a invasão russa da Ucrânia no final de fevereiro. A dependência da indústria nuclear com a Rússia é muito grande, já que esse país é responsável por 14% do fornecimento de concentrados de urânio, 27% do fornecimento de conversão e 39% da capacidade de enriquecimento. Assim, essa situação geopolítica teve como efeito uma grande pressão nos preços de todas as commodities, inclusive no urânio. Nesse período, o preço do urânio subiu mais de 38%. O preço spot de conversão aumentou 65% e os preços spot de enriquecimento aumentaram 43% este ano. Apesar do aumento substancial dos preços, esse conflito expõe os vários anos de subinvestimento em novas capacidade de produção e também as interrupções no fornecimento devido à pandemia do Covid-19 [46].

6.2. Principais Empresas

Outro ponto importante na análise da produção é compreender sobre as principais empresas do setor para identificar possíveis riscos, tais como uma grande concentração em uma só empresa na indústria ou uma barreira para novos competidores.

Essa indústria se caracteriza por ser dominada por empresas públicas, já que a rígida regulação e um mercado potencial ainda pequeno são fatores que afastam o setor privado. Assim, a barreira de entrada para novos competidores é alta. Por exemplo, no Brasil, está em aprovação na Câmara dos deputados a pauta que libera a atuação da iniciativa privada na pesquisa e lavra de minérios nucleares, mas ainda é mantido o monopólio da atividade nas Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB), conforme está presente na Constituição. Mas, no mundo, há algumas empresas privadas no setor como a Cameco, que é a maior empresa de capital aberto de urânio [28] [50].

Em geral, os maiores produtores de urânio se concentram em poucos países como o Cazaquistão, Canadá, Austrália e Rússia. Vale destacar que, apesar de uma certa concentração da indústria em poucas empresas, há novos competidores que estão crescendo como a CNNC. Assim, enxerga-se que, com o crescimento do mercado de urânio, pode haver uma diversificação [28].

6.2.1. Kazatomprom

A Kazatomprom, empresa estatal do Cazaquistão, é a maior produtor mundial de urânio, possuindo uma das maiores bases de recursos do mundo. Essa empresa possui participação maioritária em quase todas as minas de urânio no país, demonstrando sua força na mineração em relação às outras empresas. Um dado que comprova essa força é que 25% da produção global advém da empresa. Algumas das minas que são exploradas pela empresa são as de Karatau, de Inkai e de Kharasan, que totalizam 15% da produção total de urânio [47].

6.2.2. Orano

A Orano é uma empresa do estado francês que faz exploração de urânio em diversas regiões no mundo, tais como Canadá, Cazaquistão e Níger. Essa empresa fez acordos com esses países para ter participação nas operações, totalizando 9% da produção global de urânio. Assim, as minas que estão no portfólio da empresa são, principalmente, Cigar Lake no Canadá, Sumair no Níger e Katco no Cazaquistão [34].

6.2.3. Rosatom

A Rosatom, companhia estatal da Federação Russa que cuida do complexo energético nuclear do país, possui uma das maiores quantidades de recursos de urânio (segundo lugar no mundo) e também de produção (quarto lugar no mundo). Essa estatal faz a mineração tanto na própria Rússia quanto em outros lugares a partir de um *joint venture*. O ramo de mineração na própria Rússia é feito pela subsidiária ARMZ, enquanto a mineração de urânio “não russos” é feita pela Uranium One [34].

- *Uranium One*

A Uranium One, subsidiária de mineração no exterior da Rússia, é a terceira maior produtora de urânio, correspondendo a 9% da produção no mundo. Os principais ativos do portfólio da empresa se concentram no Cazaquistão. Nessa região, a empresa possui participação em diversas minas, como as minas de Karatau e de Kharasan que representam 8% de todo urânio produzido. Há novos projetos de expansão para outros países como Tanzânia e Namíbia que estão em fase de estudo geográfico e morfológico [34].

- *ARMZ*

A ARMZ, empresa de mineração local da Rússia, possui 5% da produção mundial de urânio e os principais depósitos se concentram em quatro distritos:

- Distrito Trans-Ural, com a mina Dalur.
- Distrito de Streltsovskiy, com as minas subterrâneas de Priargunsky.
- Distrito de Vitimsky, com a mina Khiagda.
- Distrito remoto de Elkon, descoberto mais recentemente.

Dentre esses, os que possuem mais relevância são as minas de Priargunsky e Khiagda, representando cerca de 80% da produção local da Rússia. Na mina Khiagda, a produção cresceu cerca de 310% nos últimos 8 anos, enquanto a de Priargunsky caiu aproximadamente 40% nesse mesmo período. Enxergando essa oscilação, a Rússia está avançando com projetos internos focados em explorar o extremo oriente do país e o norte da Sibéria [34].

6.2.4. Cameco

A Cameco, empresa de mineração com sede no Canadá, tem bastante relevância no ramo por conta da participação majoritária em uma das minas com maior teor de urânio que é a Cigar Lake no Canadá. Além dessa mina, a empresa possui participação, em um tamanho menor, na mina de Inkai no Cazaquistão. Assim, a empresa é uma das acionistas das duas maiores minas do mundo, sendo que a produção da Cameco representa 9% do total de produção [34] [45] [46].

6.2.5. CGN

A Swakop Uranium (CGN) é uma empresa constituída para formalizar uma parceria entre a República da Namíbia e a República Popular da China, da qual 10% é da Namíbia e 90% é da China. Essa parceria resultou no maior investimento individual da China na África para construir a Mina Husab. Essa mina representa 7% da produção mundial, fazendo com que a CGN seja uma das principais mineradoras de urânio [34].

6.2.6. Outras Empresas

- Navoi Mining

A Navoi Mining é uma empresa que é extremamente influente na mineração de ouro e urânio. O foco é explorar as minas que estão presentes no Uzbequistão. Essa empresa detém 7% da produção de urânio global [34].

- CNNC

A China National Nuclear Corporation (CNNC), companhia estatal chinesa que supervisiona todos os aspectos dos programas nucleares civis e militares, possui uma subsidiária denominada China Nuclear International Uranium Corporation que é responsável por fazer a prospecção de urânio tanto no país quanto no exterior. Essa companhia possui no portfólio a mina de Rössing na Namíbia, totalizando 7% da produção total de urânio [34].

- General Atomic/Quasar

A General Atomic é uma empresa norte-americana que detém Healthgate Resources que, por sua vez, é afiliada a Quasar Resources. Essa empresa possui no portfólio a mina de Four Miles, localizada na Austrália. No país, ela é considerada como a maior mina de urânio na atualidade, representando 5% da produção mundial [34].

- BHP

A BHP Billiton é uma mineradora anglo-australiana multinacional sediada na Austrália. Dentre as minas do portfólio, a mais relevante de urânio é a Olympic Dam. Essa mina é considerada como um dos depósitos mais importantes do mundo por conta dos grandes recursos de diversas commodities (cobre, urânio e ouro). A produção dessa mina representa 4% da produção total [34].

7. PROJEÇÕES FUTURAS

Nesse capítulo, será analisado os parâmetros de demanda, oferta e o entendimento do futuro da energia nuclear.

- Demanda

Nesse gráfico abaixo, é possível enxergar que, nos últimos 50 anos de produção, há uma clara tendência de aumento em todas as partes do mundo. No passado recente, a produção foi muito influenciada por fatores não planejados, como o desastre de Fukushima em 2011 e a pandemia em 2020. Mesmo com esses acontecimentos, pode-se perceber que a produção de eletricidade se manteve em níveis históricos mais altos [28].

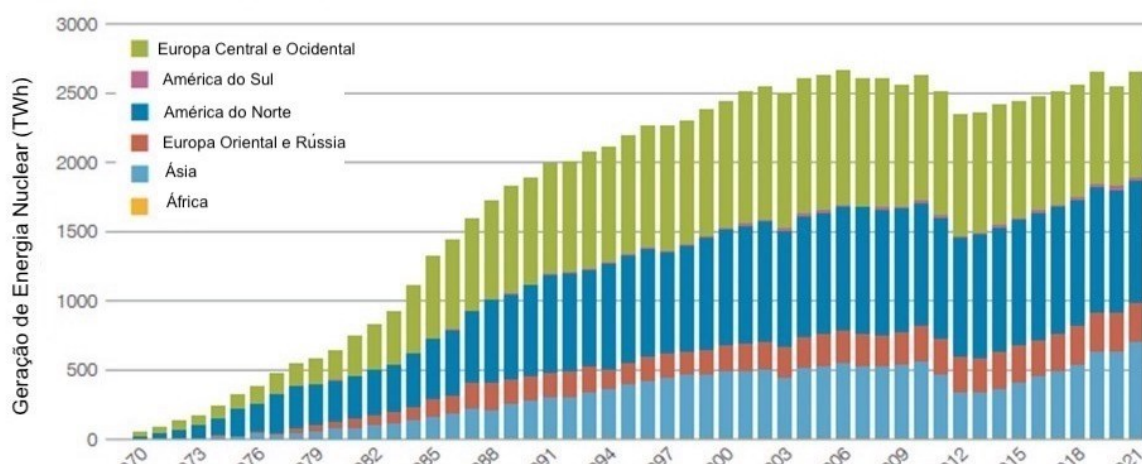


Figura 7.1: Produção por região de eletricidade por meio da energia nuclear [28]

Com auxílio do gráfico abaixo, é possível observar a tendência do passado recente com maior profundidade.

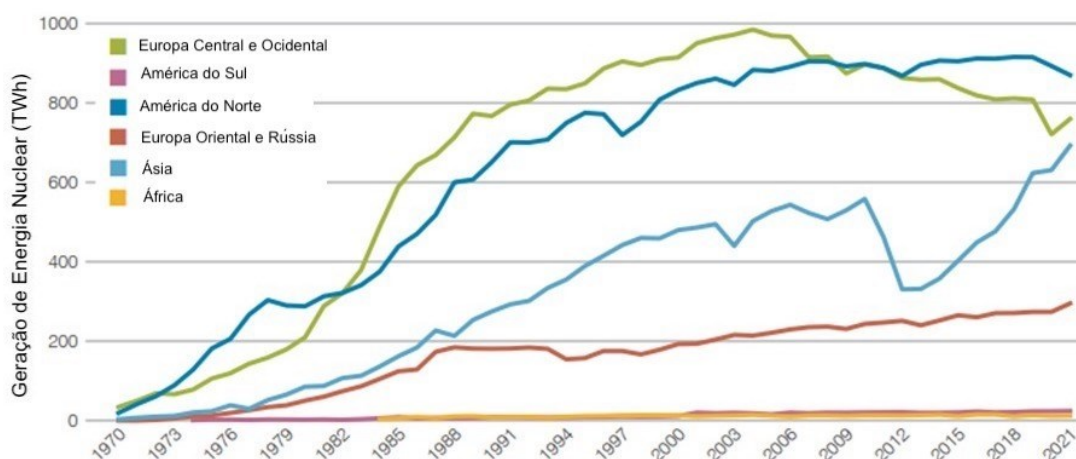


Figura 7.2: Tendência de geração da eletricidade advinda da energia nuclear [28]

Interpretando o gráfico acima, pode-se concluir que a Ásia está em um processo acelerado de aumento da energia nuclear, assim como a Europa oriental e a Rússia. Nesse período, a América do Norte se manteve estável e a Europa ocidental seguiu a tendência de baixa. Essa redução do uso da energia nuclear na Europa ocidental se justifica por fatores ESG e a manutenção da classificação dessa energia como não renovável até 2022. Vale destacar que, comparado as outras regiões, a África e a América do Sul ainda estão muito atrás [28].

A partir dos gráficos que mostram tendências de cada região, é preciso analisar os motivos que levam a esses valores para, assim, poder fornecer uma projeção para frente.

A Ásia vem atraindo o foco de construções de novos reatores, principalmente na China e na Índia. Em busca de uma diversificação maior da energia do país, a China aumentou seus investimentos desde 2017, com 16 unidades que foram colocadas em operação nesse período e deu início a construção de 13 novas unidades. Atualmente, a China possui 51 reatores nucleares, com construção já iniciada de 20 reatores (contando os 13 desde 2017 até 2021). A energia gerada atualmente por esses reatores corresponde a 5% da eletricidade do País. Como base de comparação, em países como Estados Unidos e Rússia, essa porcentagem é mais próxima de 20%. Caso a China adote essa porcentagem como alvo, o País terá de longe o maior número de reatores e a demanda por urânio vai crescer em um nível extremamente alto [28].

Sobre o caso de Índia, o país segue a mesma trajetória que a China e está construindo mais 8 reatores, totalizando 30 reatores nucleares. Os 22 reatores que se encontram hoje

correspondem a 3% da eletricidade do País, assim, o mesmo fato se aplica para esse caso, ou seja, pode haver um aumento significativo da demanda por urânio. O gráfico abaixo ilustra de forma precisa os países que lideram os projetos de reatores nucleares nos próximos anos [48].

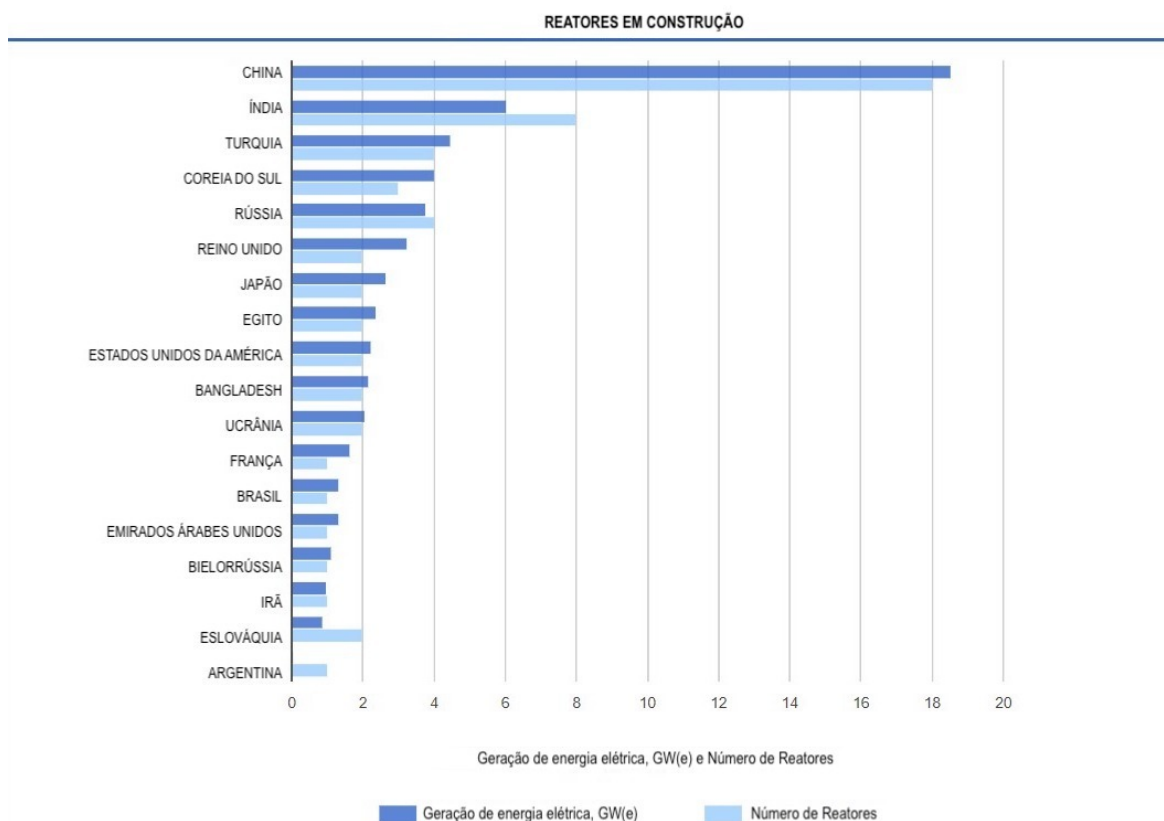


Figura 7.3: Reatores em construção por país [48]

A América do Norte, outra região extremamente relevante para a energia nuclear, mantém o nível de energia gerada, estabilizando nos 20% de eletricidade gerada por energia nuclear. Houve o fechamento de algumas usinas nucleares nos últimos anos, que pouco influenciaram na porcentagem de eletricidade gerada por conta da perda de capacidade dessas usinas [36].

Apesar do número de reatores desativados ser grande nos Estados Unidos (41), esse número representaria apenas 20% da energia produzida pelos 92 reatores que estão ativos atualmente no país. Assim, esse ponto só enfatiza que nem sempre a desativação de reatores nucleares pode ser encarada como um fator negativo [36].

Na Europa, a situação é um pouco mais complexa de ser analisada, por causa da guerra entre Rússia e Ucrânia, que alterou a dinâmica de energia. Mas, o que vinha sendo observado nos anos pré-guerra era um desinvestimento forte de alguns europeus, liderado pela Alemanha, para buscar alternativas mais limpas como eólica e solar que não geravam resíduos tóxicos. Assim, a Alemanha lidera a lista de reatores desativados durante os anos, como mostrado pela figura abaixo.

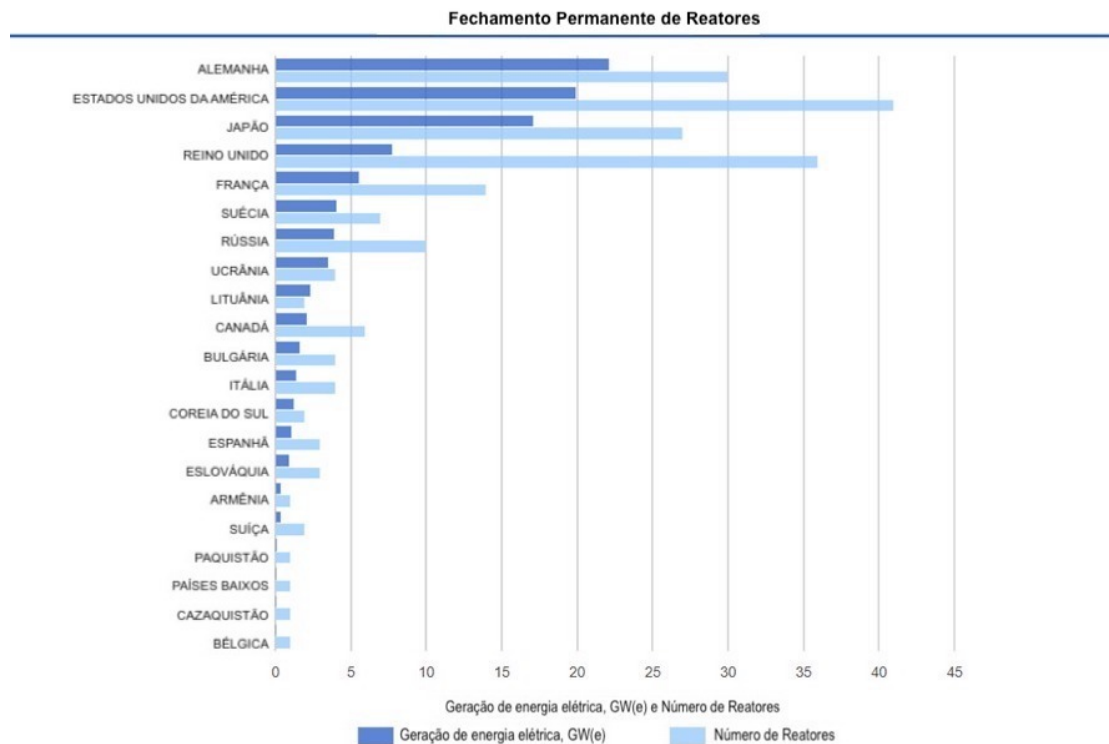


Figura 7.4: Reatores desativados por país [48]

Apesar desse desinvestimento, a guerra entre Rússia e Ucrânia levou a uma reavaliação do plano alemão de fechar os três reatores restantes do país no final de 2022. O governo de coalizão alemão, após um 'teste de estresse' realizado pelos operadores de transmissão da rede elétrica do país, concordaram em setembro de 2022 em manter Isar 2 e Neckarwestheim 2 em espera até meados de abril de 2023. Esses três reatores que permanecem em operação fornecem cerca de 6% da eletricidade do país, enquanto mais de um quarto de sua eletricidade vem de carvão [28].

Essa política de redução da energia nuclear adotada desde 2011 trouxe consequências severas para a Alemanha. Dois exemplos disso são uma maior dependência do gás russo e o

país estar abaixo da meta de redução de gás do efeito estufa. Por conta disso, o governo sofre bastante para encontrar meios de controlar uma inflação que em setembro de 2022 estava em cerca de 10%, justificada pelos altos custos da energia. Vale destacar que os governos na Europa correm contra o tempo para armazenarem gás com o objetivo de se proteger contra o inverno rigoroso. Só com esse fato, pode-se mostrar que a estratégia do país em abolir a energia nuclear se provou equivocada, visto que grande parte da energia ainda é resultado de combustíveis fósseis que prejudicam mais o ambiente. Assim, pode-se concluir que a diversificação da matriz energética é extremamente importante [28].

Para efeito de comparação, a França por ter em sua matriz 70% da eletricidade vinda de energia nuclear, evita 300 milhões de toneladas de emissões de gás carbônico. Além da França, outros países como a Inglaterra estão apontando para direção contrária da Alemanha. Essa estratégia se mostra assertiva visando uma diminuição da dependência de outros países para fornecimento de energia e também para redução da emissão de gás carbônico. Em fevereiro de 2022, a França anunciou planos para construir até 14 novos reatores nucleares até 2035. Assim, na Europa, enxerga-se uma reversão da tendência que era de repulsão à energia nuclear [28].

Em relação a oferta de urânio, pode-se enxergar pelo gráfico abaixo que os recursos minerados de urânio não estão compatíveis com a demanda atual do mundo.

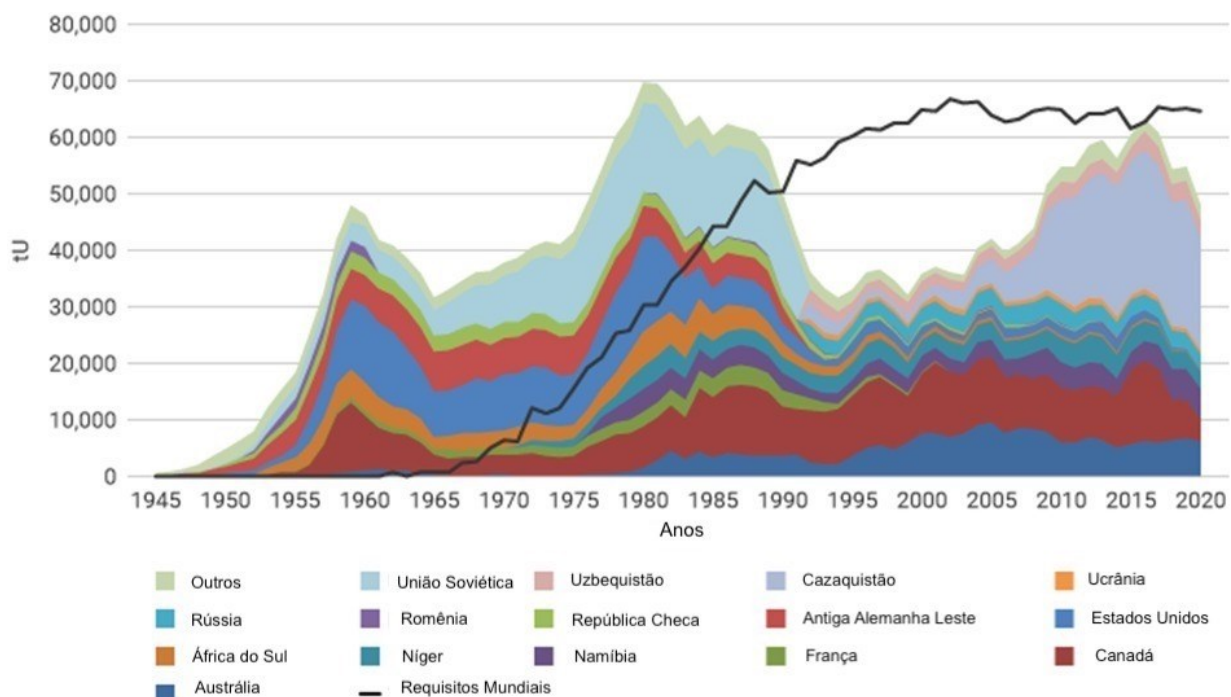


Figura 7.5: Relação entre oferta e demanda por urânio [34]

Mas esse gráfico fornece uma falsa sensação de que o cenário da demanda preocupa no curto e longo prazo, só que em 2020 houve a pandemia, o que gerou surtos em diversas minas e fez com que fossem fechadas por alguns meses. Um exemplo disso é a mina de Cigar Lake da Cameco que interrompeu as operações duas vezes por conta do covid-19 [34] [28].

E, mesmo com a pandemia, muitos produtores de urânio não sofreram com a oferta, visto que alguns deles tem contratos de longo prazo com preços fixos mais altos que os protegem. Então, episódios como pandemia e o acidente de Fukushima não fizeram os produtores quebrarem. E, nesses últimos anos, outras empresas surgiram, como a Kazatomprom, que foi capaz de gerar fluxos de caixa decentes mesmo com preços de urânio mais baixos [34] [28].

Sobre as mineradoras, elas estão sinalizando que há algumas incertezas. Um exemplo disso são as possíveis sanções à Rússia, que causariam um remodelamento da indústria nuclear, uma vez que o país é extremamente vital para a continuidade dessa indústria. Além desse fator, muitas empresas alegam a dificuldade que foi o período da pandemia, reduzindo bastante o estoque global. Em contra argumento a essas incertezas, o CEO da Cameco acredita que seja improvável que tais sanções à Rússia envolvam a indústria nuclear, visto que o mercado de urânio ainda é relativamente pequeno quando comparado aos combustíveis fósseis, dado que o mercado global de urânio movimentava cerca de US\$ 9 bilhões anualmente. Para efeito de comparação, esse valor equivale a apenas alguns dias de vendas para as principais empresas de petróleo [49].

Mesmo que não haja sanções, essas tensões geopolíticas proporcionaram dificuldades no escoamento de produção de alguns países que tem proximidade com a Rússia, caso do Cazaquistão. Esse fator contribui para o aumento da relação entre oferta e demanda, já que haverá um aumento significativo dos reatores nucleares asiáticos contrastando com uma indústria que sofreu nos últimos anos com a redução de estoques e cortes de produção por questão de preços extremamente baixos de urânio. Fora isso, a questão do Covid também pode gerar uma redução da expectativa de oferta. Por conta disso, empresas mineradoras como a Cameco enxergam que deve haver estímulos advindos de preços maiores de urânio para que haja um aumento da produção nos próximos anos [34] [28] [49].

No Brasil, há pouca movimentação em relação ao setor nuclear, visto que o terceiro reator nuclear está há mais de 30 anos para ser concluído. Mesmo com um cenário mais

animador do ponto de vista global que pode refletir de certa maneira no país, a demora para se concluir projetos do ramo nuclear e uma incerteza fiscal maior com as sinalizações do novo governo brasileiro justificam esse lado mais negativo da oferta. Na parte da demanda, é possível que haja projetos para explorar, cada vez mais, a mineração no país dada a pouca produção de urânio comparada a quantidade de recursos [28].

8. CONCLUSÕES

Os preços do urânio explodiram em meados da década de 1970. De 1973 a 1976, a cotação aumentou mais de seis vezes em termos nominais e quase cinco vezes quando medida em dólares constantes. As mudanças no mercado foram gerais. A indústria do urânio foi originalmente desenvolvida em resposta à demanda militar. A força e a perseverança do aumento do preço do urânio foram surpreendentes, até porque as previsões de queda da demanda, excesso de capacidade das usinas etc. continuaram a caracterizar a indústria durante o período em que os preços explodiram. Outra distinção útil entre os fatores pode ser entre aqueles que eram internos ao mercado de urânio e aqueles que não eram. A evolução do preço do urânio coloca esse mercado de commodity junto com o do petróleo em uma categoria especial. As condições que levaram à explosão do preço do urânio foram excepcionais em vários aspectos. A generalidade do problema torna-se aparente quando se percebe quão amplamente os governos penetraram nos mercados internacionais de commodities.

Esse momento atual da indústria de urânio é extremamente favorável, levando em conta que há uma expectativa de uma demanda maior, principalmente, advinda da Ásia, o que pode proporcionar um desbalanceamento ainda maior da relação entre oferta e demanda, proporcionando que o preço da commodity aumente. Além disso, o patamar de preço está muito baixo, tanto que as empresas mineradoras estão necessitando mais estímulos para voltar a uma produção maior de urânio.

Outro fator que é considerado como positivo para a demanda é a revisão da classificação da energia nuclear na União Europeia para energia verde, podendo ser um ponto de inflexão para uma demanda que está em queda na Europa. Vale destacar que diversos países estão revisando a matriz energética para ter uma influência maior da energia nuclear como França, Inglaterra, Japão e até Alemanha.

Do ponto de vista da oferta de urânio, há o avanço significativo das vacinas para Covid-19, o que beneficia as mineradoras com um menor número de fechamentos de minas, excluindo possíveis riscos de uma execução pior do que o esperado. Fora isso, os números de recursos de urânio comparados ao de produção atual são muito maiores. E, conforme o setor seja estimulado, as empresas serão incentivadas a fazer uma prospecção e mineração mais focada nesse minério e pode haver uma revisão para cima desses números.

Dessa maneira, pode-se concluir que a produção de urânio será maior nos próximos anos, assim como haverá uma influência mais significativa do setor nuclear sobre as matrizes energéticas dos países. Alguns pontos importantes a serem acompanhados são:

- Possíveis sanções ao setor nuclear da Rússia, o que causaria um remodelamento de toda indústria nuclear dada a importância desse país para a oferta e demanda.
- Novas ondas de Covid-19, proporcionando um fechamento das minas.
- Novos desastres ambientais ou acidentes nucleares, que poderiam gerar um aumento do receio dos investidores a investir em urânio, mantendo os preços em um patamar mais baixo por mais tempo.
- Regulação do setor, já que essa ainda restringe o acesso a poucos países.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BATISTA, C. Urânio (U): o que é, características e aplicações. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/uranio/>>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- [2] What is Uranium? How Does it Work - World Nuclear Association. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/what-is-uranium-how-does-it-work.aspx>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- [3] MITYAEV, Y. Nuclear power in Brazil. Soviet Atomic Energy, v. 16, n. 4, p. 475–476, 1964.
- [4] PAPPAS, S. Uranium: Facts about the radioactive element that powers nuclear reactors and bombs. Disponível em: <<https://www.livescience.com/39773-facts-about-uranium.html>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [5] Nuclear fuel cycle. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/en-us/Nossas-Atividades/nuclear-fuel-cycle>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [6] BBC NEWS BRASIL. Mineração de urânio no sertão da Bahia traz à tona memória de contaminação. BBC, 19 out. 2019.
- [7] STRATEGIC PLAN. Conventional uranium mills. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/extraction-methods/conventional-mills.html>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- [8] STRATEGIC PLAN. In situ recovery facilities. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/extraction-methods/isl-recovery-facilities.html>>. Acesso em: 9 jul. 2022.
- [9] In-situ recovery. Disponível em: <<https://www.srk.com/en/publications/in-situ-recovery>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [10] STRATEGIC PLAN. Heap leach and ion-exchange facilities. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/extraction-methods/heap-leach-ion-exchange.html>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

- [11] Uranium Enrichment. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [12] Conversion - World Nuclear Association. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/conversion-and-deconversion.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [13] COMPLETO, V. M. P. Combustível Nuclear. Disponível em: <<https://www.brasilemdefesa.com/2015/10/combustivel-nuclear.html>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [14] PATRICK LANDMANN/SCIENCE PHOTO LIBRARY. Nuclear fuel pellets - Stock Image - T175/0146. Disponível em: <<https://www.sciencephoto.com/media/342567/view/nuclear-fuel-pellets>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [15] Nuclear fuel fabrication - world nuclear association. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [16] INB faz uso da tecnologia para produzir Mini Elemento Combustível na unidade de Resende. Disponível em: <<https://avozdacidade.com/wp/inb-faz-uso-da-tecnologia-para-produzir-mini-elemento-combustivel-na-unidade-de-resende/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [17] COMUNICAÇÃO, T. K. Blog com Ciência. Disponível em: <<https://museuweg.net/blog/como-funcionam-as-usinas-nucleares/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [18] PICKARD, J. K.; COHEN, E. R. Nuclear Power Reactors. Physics today, v. 11, n. 4, p. 42– 43, 1958.
- [19] AQUÍ, C. Unidade de Armazenamento a Seco. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Paginas/UAS.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [20] Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20El%C3%A9trica.pdf>>

>. Acesso em: 10 jul. 2022.

[21] FGV ENGENHARIA. Energia Nuclear. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/pdf_fgv-energia_web.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022b.

[22] RITCHIE, H. What are the safest and cleanest sources of energy? Disponível em: <<https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

[23] 10 anos da tragédia do Japão: os erros de Fukushima. Disponível em: <<https://www.comunicacaoecrise.com/site/index.php/artigos/1168-10-anos-da-tragedia-do-japao-os-erros-de-fukushima>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

[24] Atomic Bomb - Development and proliferation of atomic bombs. , [s.d.]. (Nota técnica).

[25] IZIQUE, C. A retomada de Angra 3. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/a-retomada-de-angra-3/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

[26] Fang, J., Lau, C. K. M., Lu, Z., & Wu, W. (2018). Estimating Peak uranium production in China – Based on a Stella model. Energy Policy, 120, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.049>

[27] Trieu, L. H., Savage, E., & Dwyer, G. (1994). A model of the world uranium market. Energy Policy, 22(4), 317–329. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90006-x](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90006-x)

[28] World Nuclear Performance Report 2022. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/getmedia/9dafaf70-20c2-4c3f-ab80-f5024883d9da/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.

[29] MELLO, C. Poços de Caldas vive ao lado de uma barragem de rejeitos radioativos. Disponível em: <<https://climainfo.org.br/2019/02/27/pocos-de-caldas-vive-ao-lado-de-uma-barragem-de-rejeitos-radioativos/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

[30] Caetité. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Caetite>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

[31] A vida no entorno da única mina de urânio da América Latina. Disponível em: <<https://rosalux.org.br/caetite-ba-a-vida-no-entorno-da-unica-mina-de-uranio-da-america-latina/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

- [32] Santa Quitéria. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Santa-Quiteria>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [33] Urânio no Ceará: Mina em Santa Quitéria é apontada como "nova CSP". Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/negocios/uranio-no-ceara-mina-em-santa-quiteria-e-apontada-como-nova-csp-1.2158054>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [34] World uranium mining - world nuclear association. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [35] Uranium in Canada. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/canada-uranium.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [36] Nuclear Power in the USA. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [37] Nuclear Power in Russia. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [38] Nuclear Power in Ukraine. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [39] Uranium in Kazakhstan. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/kazakhstan.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [40] Uzbekistan uranium - world nuclear association. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/uzbekistan.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [41] China's Nuclear Fuel Cycle. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [42] Nuclear Power in Japan. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [43] LINDEKE, W. A.; TJIVIKUA, T. Uranium mining in namibia: New solutions: a journal of environmental and occupational health policy: NS, v. 5, n. 4, p. 72–79, 1995.
- [44] HAMPSON, D. C. Australia's uranium. Resources policy, v. 6, n. 2, p. 143–152, 1980.

- [45] Uranium price - markets - invest - cameco.
Disponível em: <<https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [46] Contracting framework - markets - invest - cameco.
Disponível em: <<https://www.cameco.com/invest/markets/marketing-framework>>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- [47] Kazatomprom Website - Disponível em:
<https://www.kazatomprom.kz/storage/2b/kap_investor_handout_3q.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [48] Reactor database global dashboard - world nuclear association. Disponível em:
<<https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/reactor-database.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [49] World Nuclear Fuel Conference report. Disponível em:
<<https://www.neimagazine.com/features/featureworld-nuclear-fuel-conference-report-9793490/>>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- [50] Câmara pode votar regras sobre minérios nucleares e dedução do IR para doações a programas de saúde. ([s.d.]). Portal da Câmara dos Deputados. Recuperado 4 de janeiro de 2023, de <https://www.camara.leg.br/noticias/923577-camara-pode-votar-regras-sobre-minerios-nucleares-e-deducacao-do-ir-para-doacoes-a-programas-de-saude/>