



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ÁLVARO BARBOSA DE CASTRO FILHO

**ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: FONTE DE ENERGIA ESSENCIAL PARA
DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.**

**PALMAS, TO
2022**

ÁLVARO BARBOSA DE CASTRO FILHO

ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: FONTE DE ENERGIA ESSENCIAL PARA
DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT
– Universidade Federal do Tocantins –
Campus Universitário de Palmas, Curso de
Engenharia Elétrica para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada
em sua forma final pelo Orientador e pela
Banca Examinadora.

Orientador: MSc. Alcy Monteiro Junior

PALMAS, TO
2022

<https://sistemas.uft.edu.br/ficha/>

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- F4S1e Filho, Álvaro Barbosa de Castro.
Energia nuclear no Brasil: Fonte de energia essencial para diversificação da matriz energética brasileira. / Álvaro Barbosa de Castro Filho. – Palmas, TO, 2022.
77 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2022.
Orientador: Alcy Monteiro Júnior
1. Elementos fundamentais de energia nuclear. 2. Tecnologia do reatores..
3. Aspectos ambientais e econômicos. 4. Programa nuclear brasileiro. I.
Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

ÁLVARO BARBOSA DE CASTRO FIHO

ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL: FONTE DE ENERGIA ESSENCIAL PARA DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.


Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 05 / 07 / 2022


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ALCY MONTEIRO JUNIOR
Data: 05/07/2022 20:19:11-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Me. Alcy Monteiro Junior, UFT

Documento assinado digitalmente
 ADELICIO MAXIMIANO SOBRINHO
Data: 06/07/2022 07:35:27-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Adelicio Maximiano Sobrinho, UFT

Documento assinado digitalmente
 GISELE SOUZA PARMEZZANI MARINHO
Data: 07/07/2022 14:45:03-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof^a. Ma. Gisele Souza Parmezzani Marinho, UFT

PALMAS, TO
2022

À Deus em primeiro lugar
À minha família
E em especial a minha mãe,
Maria de Lourdes Pereira.

AGRADECIMENTOS

Em princípio quero agradecer a Deus pela sabedoria, conhecimento e perseverança que me deu, sem isso não teria chegado até aqui.

A minha família que sempre me apoiou no início desta etapa acadêmica até os dias de hoje em que me encontro, sempre estiveram ao meu lado e acreditaram no meu sucesso.

A todos os meus amigos que nos momentos bons e ruins se mantiveram ao meu lado, sempre a estender a mão quando eu precisava, tanto amigos de minha cidade quanto os da própria UFT.

Ao Professor MSc. Alcy Monteiro Junior, pela atenção que me orientar neste trabalho e acreditar no meu potencial.

RESUMO

Com a crescente demanda de energia elétrica no Brasil a matriz elétrica brasileira está ficando cada vez mais diversificada por fontes renováveis e não renováveis, fazendo com que tenha garantia da sustentabilidade e desenvolvimento econômico com responsabilidade socioambiental. Porém, com o atual cenário de crise econômica e mudanças climáticas faz-se necessários investimentos em pesquisas acerca de energias que não dependem de mudanças climáticas, que seja limpa e ocupe o mínimo espaço possível na natureza. O Brasil rico em urânio, porém, pouco explorado suas jazidas, é um combustível ideal para tecnologia nuclear na qual se destaca por seu caráter de energia estocável, ou seja, firme, não emissora de gases poluentes, segura e confiável quando comparada com o carvão mineral. Buscando novas soluções e fontes de energia, o objetivo desse trabalho é apresentar um conceito mais amplo a respeito da energia nuclear e sua participação na matriz energética brasileira, analisando os impactos socioeconômicos e ambientais de uma fonte ainda polêmica, porém promissora.

Palavras-chaves: Demanda de energia elétrica. Urânio. Energia Nuclear. Energia limpa.

ABSTRACT

With the growing demand for electricity in Brazil, the Brazilian electricity matrix is becoming increasingly diversified by renewable and non-renewable sources, ensuring sustainability and economic development with social and environmental responsibility. However, with the current scenario of economic crisis and climate change, it is necessary to invest in research on energy that does not depend on climate change, that is clean and occupies the smallest possible space in nature. Uranium-rich Brazil, which is little explored in its deposits, is an ideal fuel for nuclear technology in which it stands out for its storable energy character, that is, firm, non-polluting, safe and reliable when compared to coal. Seeking new solutions and energy sources, the objective of this paper is to present a broader concept about nuclear energy and its participation in the Brazilian energy matrix, analyzing the socioeconomic and environmental impacts of a still controversial but promising source.

Key-words: Electricity demand. Uranium. Nuclear energy. Clean energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Representação da Fissão em Cadeia.	22
Figura 2- Jazida de Mineração de Urânio.....	25
Figura 3- Esquema de Ultracentrífuga.....	26
Figura 4- Processo de reconversão por via úmida, (UF6) transformado em (UO2).	28
Figura 5- Processo de produção das pastilhas.	28
Figura 6- Reator PWR	32
Figura 7- Reator BWR.....	33
Figura 8- Reator HWR	34
Figura 9- Reator Refrigerado a Gás (GCR).....	35
Figura 10- Reator Regenerador Rápido (FBR).....	36
Figura 11- Exemplo de Reator de IV Geração.	38
Figura 12- Reactores em Operação.	38
Figura 13- Contribuição de cada fonte na matriz energética mundial.....	39
Figura 14- Participação Nuclear em Geração de Eletricidade.....	40
Figura 15- Reactores Nuclear em Construção por Tipo.....	41
Figura 16- Emissões de Gases de Efeito Estufa do Brasil de 1990 a 2020.	45
Figura 17- Emissões de GEE no Brasil 2019 e 2020 (tCO2e)	46
Figura 18- Emissões brasileiras por setor, antes e depois do PNMC.....	47
Figura 19- Emissões de GEE no setor de Energia(1970- 2020).....	48
Figura 20- Geração de Eletricidade por Fonte (1970-2020)	49
Figura 21- Exemplo de uma instalação com módulos de armazenamento a seco.....	53
Figura 22- Escala Internacional de Acidentes Nucleares.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Reservas mundiais de urânio.....	23
Tabela 2- Principais Jazidas no Brasil.....	24
Tabela 3- Porcentagem de Urânio 235 para cada fim.	27
Tabela 4- Países com o maior número de centrais nucleares e potência instalada.....	40
Tabela 5- Fonte Térmica X Potencial Calorífico.....	49
Tabela 6- Fonte de Energia X Área Física (ha)	50
Tabela 7- Custos Por Fonte de Geração.	69
Tabela 8- Custo da energia e produção anual das usinas brasileiras	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ATM	Atmosfera Física
BWR	Boiling Water Reactor
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
COP	<i>Conference of the Parties</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FBR	<i>High Temperature Gas Reactor</i>
FCN	Fábrica de Combustível Nuclear
GCR	<i>Gas Cooled Reactor</i>
GEE	Gás de Efeito Estufa
GW	Giga Watt
HWR	<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
INES	International Nuclear Event Scale
MCTIC	Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MWe	Mega Watt
MME	Ministério de Minas e Energia
MtCO ₂ e	Milhões de Toneladas de CO ₂ equivalente
ONU	Organização das Nações Unidas
PDE	Plano Decenal de Expansão
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNE	Plano Nacional de Energia
PRIS	<i>Power Reactor Information System</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RBMK	<i>Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalnyy</i>

RMB	Reator Multipropósito Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMR	<i>Small Modulador Reactores</i>
SN	Submarino Nuclear
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
TCAU	Tricarbonato de Amônia e Uranila
TCU	Tribunal de Contas da União
TON	Tonelada
WNA	<i>World Nuclear Association</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Gás Carbônico
UF_6	Hexafluoreto de Urânio
U-235	Urânio Enriquecido
$(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$	Diurano de Amônio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Justificativa	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	Metodologia	18
1.3.1	Metodologia da Pesquisa	19
1.4	Estrutura da Dissertação	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Elementos Fundamentais da Energia Nuclear	21
2.1.1	Conceito.....	21
2.1.2	Fissão Nuclear	21
2.1.3	Ciclo do Combustível Nuclear (URÂNIO)	22
2.1.3.1	<i>Mineração e Beneficiamento</i>	24
2.1.3.2	<i>Conversão do Urânio</i>	25
2.1.3.3	<i>Enriquecimento do Urânio</i>	26
2.1.3.4	<i>Reconversão</i>	27
2.1.3.5	<i>Fabricação de Pastilhas</i>	28
2.1.3.6	<i>Fabricação do Elemento Combustível</i>	29
2.2	Considerações Finais	29
3	TÉCNOLOGIA DOS REATORES E PANORAMA MUNDIAL E BRASILEIRO	30
3.1	Considerações Iniciais	30
3.2	Tecnologia dos Reatores Comerciais	30
3.2.1	Reator de Água Pressurizada (PWR)	30
3.2.2	Reator de Água Fervente (BWR)	32
3.2.3	Reator de Água Pesada (HWR ou PHWR).....	33
3.2.4.	Reator Refrigerado a Gás (GCR)	34
3.2.5.	Reator Regenerador Rápido (FBR).....	35
3.2.6.	Reatores Híbridos.	36
3.2.7.	Reator Nuclear de Geração IV	37
3.3	Panorama Mundial e Brasileiro	38
4	ASPECTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS	44
4.1.	Aspectos Ambientais	44

4.2. Resíduos Radioativos.....	50
4.3. Acidentes com Reatores Nucleares	54
4.3.1 Three Mile Island	57
4.3.2. Chernobyl	58
4.3.3. Fukushima	59
4.4. Principais Desafios.	60
4.5. Programa Nuclear Brasileiro.....	63
4.5.1. Usina Termonuclear Angra I.....	63
4.5.2. Usina Termonuclear Angra II.	65
4.5.3. Usina Termonuclear Angra III.....	65
4.6. Análise Econômica.	66
4.6.1. Custos Globais de Geração (CGG).....	67
4.6.2. Taxa Interna de Retorno. (TIR)	68
4.6.3. Payback.....	68
4.7. Competitividade Econômica.	69
5 CONCLUSÃO.....	72
5.1. Contribuições do trabalho.....	73
5.2. Trabalhos futuros.....	73
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que com a evolução da humanidade, vem a necessidade de novas fontes de energia para suprir suas necessidades. No início do período pré-industrial a fonte de energia que homem conseguia utilizar era sua própria energia e luz solar, tanto para fazer moagens de grãos quanto para bombeamentos de água, conseqüentemente já no período industrial como houve um aumento de consumo de energia, surgiram novas formas de aproveitamento energético, sendo a principal delas a queima de carvão mineral que supria e movimentava as máquinas a vapor, pois, quando queimada, libera uma grande fonte de calor e com isso, aquece a água formando vapor. Essas foram utilizadas na produção das primeiras fábricas e nas locomotivas de trens de ferro que transportam diversos materiais. (FLORES, 2014)

Em meados do século XIX o petróleo passou a ser a principal fonte de energia, pois, nesse mesmo período tem-se a invenção do motor a combustão interna em larga utilização em máquinas, onde estava presente em várias aplicações, como em veículos, trens e em usinas de geração de energia elétrica. Assim surgiram as primeiras usinas elétricas, através do petróleo, em que o combustível queimado transforma calor em eletricidade. A energia gerada era mais utilizada na iluminação pública, com o aumento do consumo de energia e aumento das redes de distribuição e urbanização no mundo só a queima de petróleo já não era tão lucrativa, surgindo assim a necessidade de novas fontes de energia. Como alternativa iniciaram-se as primeiras usinas hidrelétricas que usavam a força das águas na geração de energia elétrica em que logo substituiria as usinas termelétrica. (FLORES, 2014)

Com o consumo crescente de energia elétrica e os impactos ambientais causados com o surgimento da evolução tecnológica e ao excesso de utilização de energia devido a melhoria da qualidade de vida, a variedade na matriz energética passou a ser de extrema importância no contexto mundial, em que a mesma abrange interesses ambientais, políticos, sociais e econômicos. Diante desse cenário, os governos e a sociedade a elaboram um planejamento em novas alternativas para geração de energia elétrica, em que fornecessem de forma segura a energia necessária para o desenvolvimento econômico e social de um país, de forma a minimizar os impactos ambientais. (PNE 2050, 2021)

É considerada energia limpa, aquela que provém de fontes de energia que não usam a queima de combustíveis, que não geram emissão de CO₂. No processo da energia nuclear é gerado o vapor, em que sob pressão faz girar as turbinas que acionam os geradores elétricos. Se compararmos com outro tipo de fonte de energia, com uma quantidade menor, pode-se

obter uma enorme emissão de energia elétrica, ocupando menos espaço e independentes de condições climáticas, sem depender de vazões de águas e até mesmo do sol. (ANEEL,2008)

A energia nuclear é uma das fontes alternativa de energia limpa que vem se destacando no mercado, onde a mesma é vista como uma das respostas para conter a emissão de gases de efeito estufa e reduzir nossa dependência de combustíveis fósseis; porém, a mesma ainda é vista com certo preconceito não só no Brasil como no mundo, pois, em decorrência de acidentes como os ocorridos em Chernobyl no ano de 1986 e em Fukushima em 2011. A energia nuclear também chamada de energia atômica ou termonuclear, é a energia que fica dentro do núcleo do átomo, que pode ocorrer tanto pela fusão quanto pela fissão do átomo. (CARVALHO, 2012)

Com a descoberta da radioatividade no fim no século XIX, a mesma só era vista como estudo acadêmico, porém foi levantada hipóteses de que poderiam ser aproveitadas para geração de energia elétrica, porém, ao fim do século XIX, foi descoberta a primeira fissão nuclear através no urânio-235, pois assim como o urânio-233 e o plutônio-239 também sofrem fissão quando atingidos por nêutrons, fazendo com que a energia seja proveniente da fissão dos átomos, no início eram utilizados para produção de bomba e geradores de energia. (BROWN et al., 2016)

Hoje tem-se 441 reatores nucleares em funcionamento em 30 países, conforme o projeto de expansão das nações como a China, Coreia do Sul, França, Alemanha, Canadá e entre outras, estão sendo construídas mais 53 usinas nucleares com perspectiva de crescimento de curto e longo prazo na Ásia, a meta até o ano de 2050 é duplicar o número de usinas, um aumento que representaria 30% da eletricidade mundial. Graças a China e outras nações asiáticas a situação dos programas nucleares mudaram para melhor o cenário nesses últimos anos, onde estão 35 dos 54 reatores nucleares em construção. Das 30 nações que possuem usinas nucleares em operação, 14 estão trabalhando na construção de novos reatores ou concluindo projetos suspensos que inclui o Brasil, também. Há 28 nações estudando a possibilidade de incluir a energia nuclear em sua matriz energética, 4 nações estão em fase avançada de preparação da infraestrutura. (AIEA, 2022)

Em 1934 o Brasil começou sua história com a energia nuclear, movido pelos avanços da tecnologia promovidos pelos Estados Unidos da América, onde com a então recém-criada Universidade de São Paulo que foi a pioneira nas pesquisas da área nuclear, fazendo com que o governo do estado promovesse a admissão de cientistas estrangeiros e intercâmbios no exterior para formar a primeira geração de físicos especializados na constituição da matéria. Em 1951 o então presidente em exercício Getúlio Vargas criou o Conselho Nacional de

Pesquisa (CNPq), empossando como seu primeiro presidente o Almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva, sendo ele representante do Brasil na comissão de energia atômica da então recém-criada ONU, em 1956 foi criada a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), cujo sua função institucional é fiscalizar e normalizar o segmento nuclear no país, 1969 foi o ano decisivo para construção da primeira usina nuclear no Brasil, com tecnologia norte americana.(ELETRONUCLEAR, 2013)

Sabe-se que os benefícios que a energia nuclear trouxe para humanidade e sociedade são inegáveis quando usado para fins pacíficos, utilizando fontes radioativas com inúmeras aplicações, tanto na medicina, agricultura, indústria e principalmente na geração de energia elétrica, hoje temos aproximadamente mais de 3 mil instalações que funcionam com fontes radioativas nas devidas aplicações mencionadas. Quanto ao risco na emissão de radiação na geração de energia elétrica os governos estão procurando mostrar para sociedade que com o avanço da tecnologia a segurança com as usinas tiveram avanços, tornando mais rígido a segurança, desde a extração no urânio até na geração de energia elétrica. (DAU,2009)

1.1. Justificativa

O Brasil por ser um país com extensões continentais, cada ano que passa está em constante evolução em sua demanda de energia elétrica, fazendo com que necessite mais de fontes de energia alternativas, que se classifiquem dentro do conceito atual de energia limpa, que não originem emissões de poluentes, assim como tem-se fontes de energia renováveis que contribuem para a diminuição de gases poluentes, tem-se fontes de energia não renováveis que também contribuem para não emissão desses gases. No Brasil, as hidrelétricas são as fontes de energia que mais são utilizadas, em que depende da disponibilidade de água nos rios, é um recurso infinito, mas, desde que não ocorra o esgotamento de bacias hídricas pela ação direta do homem ou por alterações climáticas observadas no Brasil, em que certos meses do ano os reservatórios estão abaixo dos níveis, fazendo com que seja preciso o consumidor receber energia elétrica de outra fonte alternativa, que é são das termelétricas. (VILLALVA, 2015)

De acordo com Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE 2030), indica-se a necessidade de investimento no setor de energia nos próximos 10 anos, relacionados a petróleo, gás natural e biocombustíveis, além da geração centralizada, geração distribuída e transmissão de energia elétrica, a modernização do setor elétrico é um dos assuntos mais abordados nos últimos tempos no Congresso Nacional com a elaboração do PDE abrindo

caminho para desoneração das tarifas de consumidores de energia elétrica em todo Brasil, modernização do modelo de contratação e precificação da energia elétrica gerada pela usina nuclear de Angra 3. (PDE 2030, 2021).

O Brasil ainda no período decenal, deverá seguir como uma das matrizes energéticas mais diversificadas do mundo, em 2020, 48% da matriz energética brasileira foi renovável devendo manter esse patamar até 2030. Vale ressaltar que Angra 3 entrará em operação representando a expansão nuclear decenal no horizonte decenal com os devidos atributos de confiabilidade de geração, elevado fator de capacidade e livre de emissões de gases causadores do efeito estufa, concretizando essa tecnologia como opção na matriz elétrica brasileira. (PDE 2030, 2021)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar um estudo a respeito da energia nuclear como fonte de energia alternativa para matriz energética brasileira, abordando conceitos fundamentais ao urânio, fatores ambientais e econômicos de uma forma crítica em cenários atuais e perspectivas futuras.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Análise dos elementos principais que compõe uma usina nuclear;
- Panorama mundial e brasileiro, especificando suas usinas instaladas em operação e em construção;
- Impactos ambientais na geração nuclear;
- Descrição de aspectos econômicos, desafios para evolução da energia nuclear no país e aceitação pública.

1.3 Metodologia

O método hipotético será utilizado para a elaboração deste trabalho, explanando os assuntos para obter-se um embasamento satisfatório.

1.3.1 Metodologia da Pesquisa

Primeiramente será realizado um levantamento de todo material bibliográfico necessário acerca dos assuntos específicos que serão abordados, afim de obter embasamento teórico satisfatório para o entendimento geral. As fontes utilizadas para compilações e consultas foram distribuídas entre monografias, teses, dissertações, artigos de revistas renomadas da área, livros, artigos especializados, relatórios técnicos oficiais de conferências da AIEA, periódicos e além de alguns registros gerais (sites oficiais e similares). Para este trabalho ter uma base sólida acerca da atualidade e ter um entendimento melhor, serão utilizados sites oficiais do governo.

1.4 Estrutura da Dissertação

No desenvolvimento do trabalho com as estimativas abordadas, feito é apresentado o levantamento dos dados para alcançar o objetivo final e foi traçado o seguinte percurso a ser seguido:

O trabalho foi dividido em 5 capítulos, primeiramente a introdução, contextualizando o tema proposto neste trabalho, onde são mostrados os principais fatos históricos no desenvolvimento humano e tecnológico na relação no setor energético no consumo e geração de energia elétrica. Baseados na justificativa do tema, são revisadas diversas fontes bibliográfica, e da mesma forma são estabelecidos os resultados esperados por meio da definição de seus objetivos.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica acerca dos elementos fundamentais das usinas nucleares, caracterizando conceitos quanto a geração de energia, como ocorre a fissão nuclear, além de abordar o ciclo do urânio nas usinas nucleares.

O Capítulo 3, afim de prospectar tanto a nível mundial quanto a nível brasileiro a utilização desta fonte, foi abordado um panorama acerca dos respectivos assuntos citados, permitindo que tenha um embasamento satisfatório das usinas nucleares que se encontram em operação.

O Capítulo 4 apresenta os impactos ambientais que as termonucleares têm em relação as emissões de gases poluentes, os armazenamentos dos rejeitos e os principais acidentes com reatores nucleares, destaca-se neste capítulo os desafios da energia nuclear quanto a aceitação pública, tecnologia brasileira com seus reatores em operação, aspectos econômicos fazendo um comparativo com algumas fontes de energia.

Por fim no capítulo 5, são tecidas as considerações finais do trabalho, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros e contínuos a este.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos teóricos dos elementos fundamentais da energia nuclear, através de trabalhos publicados pela comunidade científica e livros conceituados.

2.1 Elementos Fundamentais da Energia Nuclear

2.1.1 Conceito

Energia nuclear, é a transformação de núcleos atômicos, conhecida como reações nucleares, em que, podem envolver uma imensa variação de energia, maior que a associada à formação ou à quebra de ligações, tendo como exemplos a energia gerada do sol e por usinas nucleares, onde representa uma grande quantidade de energia liberada pelas reações. Essas técnicas são a Fusão Nuclear e Fissão Nuclear, respectivamente. (CARDOSO, 2012)

A energia elétrica que é gerada pelas usinas nucleares acontece através do bombeamento de nêutrons, fazendo com que o núcleo atômico se subdivida em duas ou mais partículas, em que estando acelerado, estas colidem com o elemento radiativo do reator, fazendo com que o urânio fique instável e se divida em dois átomos menores, durante essa divisão acontece a liberação de energia. (BROWN et al., 2016)

2.1.2 Fissão Nuclear

A fissão nuclear nada mais é que a divisão dos átomos ao ser bombardeado com nêutrons. Isso ocorre quando um núcleo absorve um nêutron térmico e libera uma quantidade de energia, igual a energia de ligação do nêutron, em geral o núcleo formado que se liberta, produz-se os chamados “produtos de fissão”, fazendo com que a emissão dos nêutrons pelos fragmentos da fissão deixem como produtos núcleos que ainda têm um excesso, embora menor de nêutrons e em geral são radioativos, sofrem mais decaimento nuclear permitindo livrar-se de pequeno excesso de nêutrons com a emissão de radioatividade equivale a transformação de um nêutron em um próton dentro do núcleo. (BROWN et al., 2016)

Em 1939 dos físicos alemães Otto Hahn e Lise Meitner descobriram primeira fissão com o núcleo do elemento urânio-235 quando atingidos por um nêutron que se move lentamente, no caso do urânio-235 são produzidos em médias 2,4 nêutrons em uma fissão

sendo que estes podem gerar duas fissões adicionais, cada qual resultando em dois nêutrons. Com os 4 nêutrons liberados podem produzir mais 4 fissões e assim sucessivamente essa reação denomina-se “reação em cadeia”, conforme a Figura 1. A reação em cadeia é auto-sustentável, isto é, caso iniciada é capaz de manter-se sem necessidade de auxílio de um agente externo, mas, por questão de segurança a reação em cadeia deve ser controlado, pois o número de fissões e a energia liberada sofrem rápido incremento e que pode causar uma explosão. (BROWN et al., 2016)

Figura 1- Representação da Fissão em Cadeia.



Fonte: (CARDOSO, 2012)

2.1.3 Ciclo do Combustível Nuclear (URÂNIO)

O Brasil é um país que tem uma grande concentração de minério naturais, em que uma delas é o Urânio, cujo nome faz alusão ao planeta Urano. Possui uma distribuição diversificada sobre a crosta terrestre, com reservas economicamente atrativas que dependem do teor da substância presente no minério, além da disponibilidade tecnológica utilizada para a extração e beneficiamento. (HÉIDER, 2016). No Brasil a CNEN (Conselho Nacional de Energia Nuclear) é uma autarquia criada em 1956 pela União, que tem a responsabilidade de controlar o metal, a mesma considera o material estratégico, a CNEN é vinculada com o MCTIC. De acordo com a Lei N° 4.118, de 27 de agosto de 1962 foi constituído o monopólio da União para pesquisas e lavra das jazidas dos minérios nucleares, o urânio, um metal

radioativo é considerado estratégico, o comércio e a produção de matérias dessas características nucleares, pois esse monopólio atualmente vem sendo questionado amplamente por diversos órgãos e representações ligados ao setor mineral, a INB vem fazendo o arrendamento de jazidas como a de Santa Quitéria no Ceará, em que observa-se uma flexibilidade no monopólio. (BRASIL, 1962)

O metal já foi prospectado em território brasileiro, na ordem de 309.000 toneladas de urânio contido (U3O8), distribuídas entre a Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais conforme informações do Ministério de Minas e Energia (MME), estima-se que esses recursos sejam ainda maiores, pois apenas um terço do território brasileiro foi pesquisado, ainda sim com esse território prospectado o Brasil ocupa a posição de 7º lugar do ranking, conforme a Tabela 1, o Brasil detém 6% do volume total mundial. (INB, 2016)

Tabela 1- Reservas mundiais de urânio.

País	Quantidade (em mil ton.)	Participação
Austrália	1243	23%
Cazaquistão	817	15%
Rússia	546	10%
África do Sul	435	8%
Canadá	423	7,50%
EUA	342	6,80%
Brasil	309	6%
Total no Mundo	5469	

Fonte: World Nuclear Association (2021)

Embora a reserva de urânio no Brasil seja de 309.000 toneladas, a capacidade de produção ao ano é de 400.000 toneladas, mas o objeto é ampliar para 800.000 toneladas e alcançar incríveis 1.200 toneladas sob a forma de concentrado de urânio, isso depende muito de projetos de expansão da produção e realização de novas pesquisas geológicas. (INB, 2016) a seguir a tabela 2 descreve as reservas do mineral urânio no Brasil.

Tabela 2- Principais Jazidas no Brasil.

Depósito- Jazida	Medidas Indicadas			Inferidas	Total
	<US\$ 40/KgU	<US\$80/KgU	Subtotal	<US\$ 80/KgU	
	Toneladas de Urânio				
Caldas (MG)		500	500	4.000	4.500
Lagoa Real/Catité(BA)	24.200	69.800	94.000	6.770	100.770
Itataia/Santana Quitéria(CE)	42.000	41.000	83.000	59.500	142.500
Outras				61.600	61.600
Total	66.200	111.300	177.500	131.870	309.370

Fonte: (INB, 2016)

2.1.3.1 Mineração e Beneficiamento

Primeiramente para exploração do minério, é feita a coleta de dados, afim de fornecer informações suficientes para desenvolver estudos de impactos ambientais, para que inicie as operações, os dados devem ser recolhidos por pelo menos três anos antes, sendo que, um prazo adequado será determinado dependendo de o regime regulamentar aplicável, nas bases de dados, estão contidas informações hidrológicas e hidrogeológicas: flora e fauna; clima, solo, informações de pesquisas ao patrimônio e arqueológicas e avaliações do sitio. (SILVA, 2011)

A extração do mineral no Brasil é feita pela INB, onde a mesma segue técnicas correntes de mineração, geralmente a preparação do urânio é feita em uma usina próxima da jazida, o minério é extraído da mina, logo após é transportado para ser britado, onde, após a britagem primária e secundária que consiste na redução do tamanho das partículas, o material é organizado em pilhas e recebem uma solução de ácido sulfúrico que extrai o urânio da rocha, por esse processo que resulta em um líquido, licor de urânio que é uma solução de ácido sulfúrico com urânio, processo conhecido com lixiviação. Ao fim desta primeira etapa do ciclo o resultado é o concentrado de urânio (*yellowcake*), em seguida esse material é

armazenado em tambores especiais e vedados, onde seguirá para próxima etapa do ciclo, esta etapa é realizada em Caetité (BA). (INB, 2019), conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Jazida de Mineração de Urânio.



Fonte: (INB, 2019)

2.1.3.2 Conversão do Urânio

Após ter sido dissolvido e purificado, o *yellowcake* é embalado e transportado para o Canadá, em que iniciará a próxima etapa do ciclo, em que o *yellowcake* será convertido em hexafluoreto de urânio (UF₆), um sal que tem como propriedade passar para o estado gasoso em baixas temperaturas, o UF₆ enriquecido é hidrolisado para uma solução de fluoreto de uranila. Esta solução é misturada com um hidróxido concentrado de amônia produzindo um precipitado de diuranato de amônio (NH₄)₂U₂O₇, já na forma de gás é enviado para a etapa de enriquecimento. (INB, 2016)

Em Resende- RJ está em fase de andamento a implantação da FCN, onde funcionará uma unidade da INB, encontra-se em fase de preparação para contratação do Projeto Básico e obtenção das licenças junto aos órgãos responsáveis, o IBAMA e à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Com a expansão da capacidade de enriquecimento e a criação da fábrica, irá gerar uma grande economia para a empresa e um aumento de 230 postos de trabalho direto e 350 indiretos, quando a usina estiver em operação, como consequência se prevê um aumento da frota de reatores nacionais, aumentando a demanda do enriquecimento e resultará na diminuição dos custos operacionais. (INB, 2016)

2.1.3.3 Enriquecimento do Urânio

O enriquecimento nada mais é do que o aumento a concentração do urânio para que se torne possível a sua utilização como combustível, pois o urânio em sua forma natural não produz energia, o processo de enriquecimento tem objetivo de separar e aumentar a concentração dos isótopos do urânio em que irão sofrer o processo de fissão no núcleo dos reatores nucleares. A INB utiliza a técnica de ultracentrifugação em que consiste no aumento de sua concentração de urânio de 0,7% para 5%, essa técnica utiliza ultra centrifugas em cascatas e dentro destes equipamentos contém o gás hexafluoreto de urânio girando em uma velocidade extremamente alta, separando os átomos mais leves (U^{235}) dos mais pesados (U^{238}), com isso faz com que o átomo gere calor e produza energia. (INB, 2016)

A Figura 3 mostra o esquema de uma ultracentrífuga com suas partes detalhadas e a Tabela 3 informando os níveis de enriquecimento para cada aplicação.

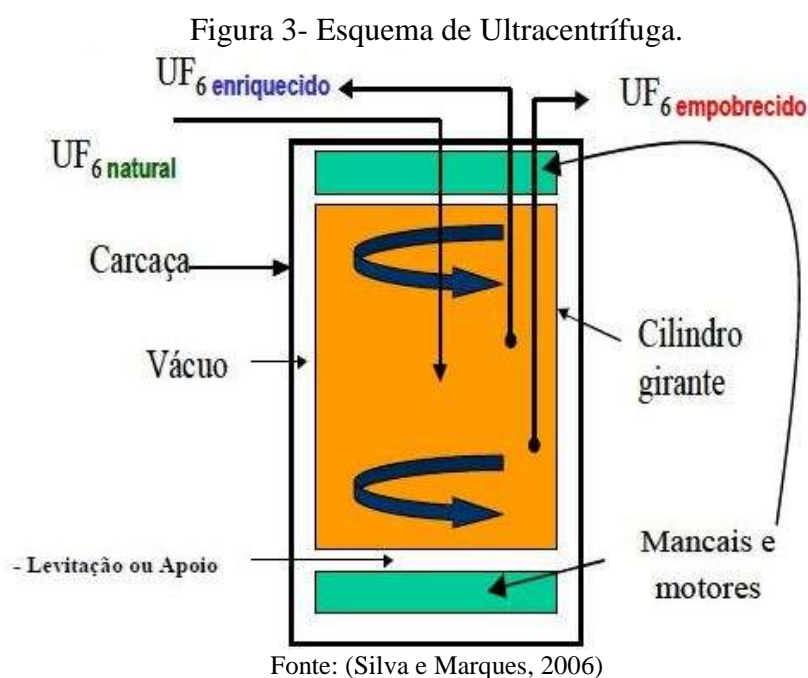


Tabela 3: Porcentagem de Urânio 235 para cada fim.

Fins	Urânio 235 (%)
Geração de Energia	3% a 5%
Reatores de pesquisa (Ex: Medicina e Agricultura)	20%
Bélico	90%

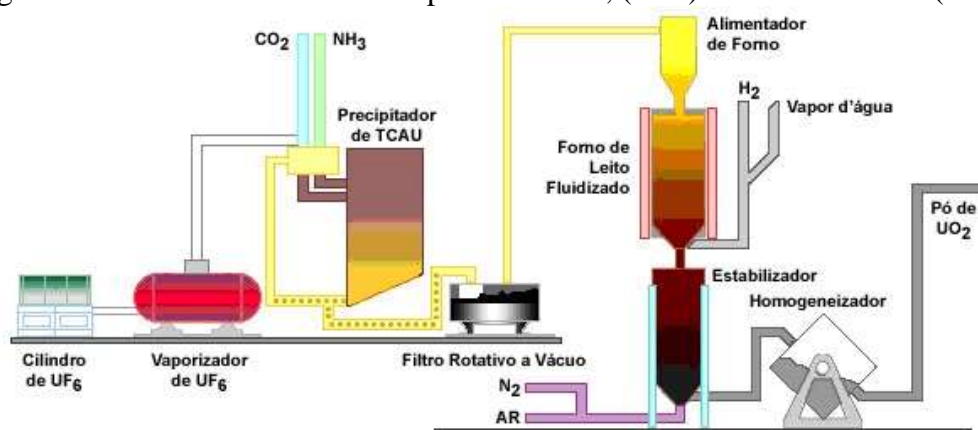
Fonte: (INB, 2016)

Está localizada em Resende-RJ a Usina de Enriquecimento de Urânio onde está sendo implantada por etapas, pois grande parte ainda é importada, com a inauguração da cascata 7 chegou a atingir 45% da quantidade média anual de urânio enriquecido, o suficiente para abastecer a central nuclear de Angra 1. A projeção feita pela INB é que, quando o projeto estiver completo o Brasil independente quanto a produção do material, previsões apontam que até 2033, será capaz de atender 100% das necessidades de Angra 1 e 2, aproximadamente até 2037 com a finalização de Angra 3, será capaz de atender suas necessidades. (INB, 2016)

2.1.3.4 Reconversão

A próxima etapa do ciclo é o processo de reconversão, em que consiste em retornar o gás UF₆ para o estado sólido, em forma de pó de dióxido de urânio (UO₂), a INB define esse processo como reconverter gás em pó e concentrar o urânio de maneira apropriada para utilização como combustível. Como pode-se ver na Figura 4 todo o processo da reconversão é executado pela técnica de via úmida em que consiste levar o UF₆ para aquecimento na autoclave, logo após é executada a precipitação em um tanque de água desmineralizada a 100°C, nesse tanque carregado é misturado com mais dois gases reagentes: o gás carbônico (CO₂) e o gás amoníaco (NH₃), fazendo com que produza o Tricarbonato de Amônia e Uranila (TCAU), em seguida já em estado sólido e na cor amarela o conteúdo do precipitado é bombeado para o filtro rotativo a vácuo para ser lavado e secado, após esse processo o TCAU é transportado para o forno em uma temperatura de 540°C e alimentado com hidrogênio (H₂) e vapor d'água, após passar pelo forno é gerado o pó de dióxido de urânio (UO₂), em seguida após ser estabilizado será homogeneizado onde é adicionado outros compostos de urânio, com isso pronto pra fabricação das pastilhas de urânio. (INB, 2016)

Figura 4 - Processo de reconversão por via úmida, (UF6) transformado em (UO2).

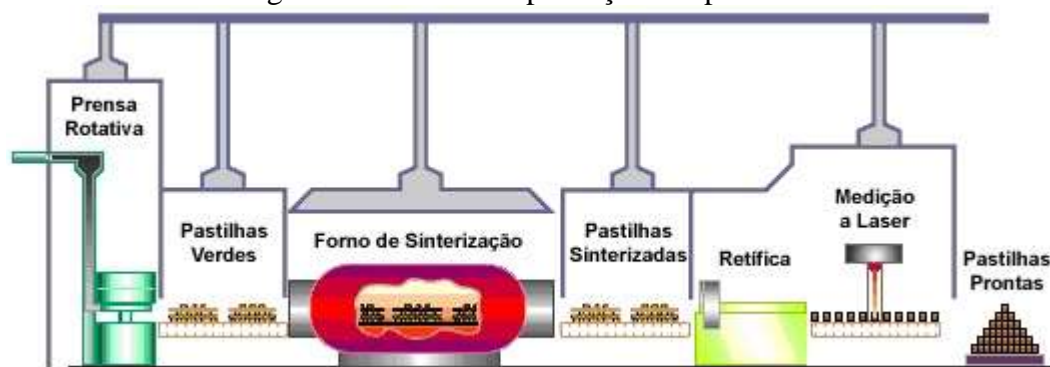


Fonte: (INB, 2016)

2.1.3.5 Fabricação de Pastilhas

Após o urânio ser enriquecido e transformado em pó (UO₂) será transportada para produção das pastilhas com forma de cilindro e dimensões de um centímetro de comprimento e de diâmetro, segue abaixo a Figura 5, mostrando o passo a passo da fabricação das pastilhas. Após ser homogeneizado o pó de (UO₂) é transportado para uma prensa onde será produzido as pastilhas verdes que serão encaminhadas para um forno para ser aquecidas em até 1750°C, para ganhar rigidez e a resistência necessária para as condições de operação, esse processo se assemelha ao de fabricação de cerâmicas onde adquirem resistência e endurecimento, seguindo esse processo é transportado para retificação onde passara por um ajuste fino de suas dimensões, após esse processo será realizada a medição a laser, que tem por finalidade rejeitar as pastilhas que estiverem suas circunferências fora de padrão, as pastilhas aprovadas são armazenadas adequadamente em caixas no depósito. (INB, 2016).

Figura 5- Processo de produção das pastilhas.



Fonte: (INB, 2016)

2.1.3.6 Fabricação do Elemento Combustível

Após ser finalizado o processo de fabricação das pastilhas a próxima etapa é fazer a montagem do elemento combustível em que consiste na colocação das pastilhas de modo empilhadas dentro de cilindros feitos de liga de aço super-resistente chamada de Zircaloy, os elementos combustíveis tem a duração de até três ciclos em seus respectivos reatores, aproximadamente três anos, após seu uso são armazenadas nas piscinas de combustíveis usados dentro das usinas. (INB, 2016)

Ao ano de 2018 foram fabricados 48 elementos combustíveis, 40 para Angra I que está na sua 24ª recarga e 8 elementos combustíveis para Angra II que está na sua 15ª recarga, em cada cilindro são inseridas um total de 335 pastilhas de urânio em um conjunto de 236 cilindros com uma altura de 5 metros, é esse elemento combustível responsável pela fissão nuclear onde será resultante no calor que vai fazer as turbinas moverem produzindo energia elétrica através do vapor da água. (INB, 2019)

2.2 Considerações Finais

Com as informações levantadas neste trabalho, foi possível obter uma fundamentação teórica acerca dos elementos fundamentais da energia nuclear, conforme proposto nos objetivos específicos, fazendo uma breve contribuição em se tratando do Urânio no Brasil e no mundo. Desta forma pode-se verificar que o Brasil é rico com esse tipo de minério, podendo ser mais explorado em larga escala, para uso próprio e exporta-los.

Ressalta-se que o Brasil tem um grande potencial para o setor de energia nuclear, sendo que o país domina todas as etapas do combustível nuclear, desde a mineração até a montagem do elemento combustível, um dos fatores que impede o avanço dessa tecnologia no país é a falta de investimentos por parte dos governantes e o monopólio total de todas as etapas, onde o mesmo é garantido pela constituição.

3 TECNOLOGIA DOS REATORES E PANORAMA MUNDIAL E BRASILEIRO

3.1 Considerações Iniciais

Conforme foi visto nos capítulos anteriores, o ciclo do urânio e uma breve introdução da proposta do trabalho, os próximos capítulos irão abranger as principais tecnologias dos reatores em uso no mundo e no Brasil mais especificamente em Angra 1, Angra 2 e o que entrará em operação em Angra 3 após a finalização de suas obras previstas para 2026.

3.2 Tecnologia dos Reatores Comerciais

Existem vários tipos de reatores com diversas combinações de materiais e disposições possíveis para se construir um reator nuclear operacional, devido a isso, tem-se várias classificações para os tipos de reatores.

Reatores de pesquisas e desenvolvimento, são destinados a pesquisas e não objetivam a produção de energia elétrica, são utilizados na produção de radioisótopos, esse tipo já é utilizado na em aplicações médicas.

Os reatores de produção e reatores de potência são usados para o aproveitamento dos materiais férteis (Urânio e Tório), a partir desses elementos são fabricados os elementos físséis e podem ser facilmente adaptados para produção de combustíveis nuclear para uso bélico.

Por fim temos os reatores de potência no qual são utilizados na produção de energia elétrica, existem reatores fixos que são das usinas nucleares e reatores móveis instalados em navios e submarinos.

3.2.1 Reator de Água Pressurizada (PWR)

Os reatores PWR são os mais usados em operação no mundo nas usinas nucleares na geração de energia elétrica, são utilizados nas usinas de Angra 1 e Angra 2 e entrará em operação em Angra 3 assim que forem concluídas suas obras, de cerca de 439 reatores nucleares em operação no mundo, cerca de 300 são do tipo PWR. (PRIS, 2021)

Este tipo de reator foi desenvolvido nos EUA, são reatores a urânio enriquecido e assim como os reatores do tipo BWR, usam a água leve como refrigerante e moderador, porém o tipo PWR introduzido no circuito de vapor um pressurizador, elevando a pressão do sistema à cerca de 150 atm, com isso melhorando as características termodinâmicas do vapor

d'água, permitindo uma potência específica maior, com o pressurizador instalado evita a vaporização da mesma, pois diferentemente do tipo BWR, o PWR não ocorre vaporização da água no núcleo do reator. (PRIS, 2021)

A água leve possui propriedades favoráveis na sua utilização em reatores nucleares em função de baixo custo associado à sua obtenção com isso ela tem a vantagem de menor custo como refrigerante quanto como moderador além de possui boas características de transferência de calor, boas propriedades nucleares, fornece lubrificação e é estável dentro dos limites de temperatura dos materiais nucleares, fazendo com que a tecnologia de transferência de calor utilizando água leve é conhecida como sistema de resfriamento relativamente simples. (IAEA, 2014)

A refrigeração do reator à água leve entra pelas aberturas de entrada do vaso do reator, fluindo para parte inferior do vaso através de uma região anular de descida, localizada entre o vaso e o barril do núcleo, sem contato com o núcleo do reator e posteriormente flui da parte inferior para parte superior do vaso do reator passando pelo elemento combustível do núcleo do reator, removendo o calor dos mesmos e escoando do vaso do reator em direção aos geradores de vapor onde ocorre a transferência de calor entre o sistema primário e secundário. (IAEA, 2014)

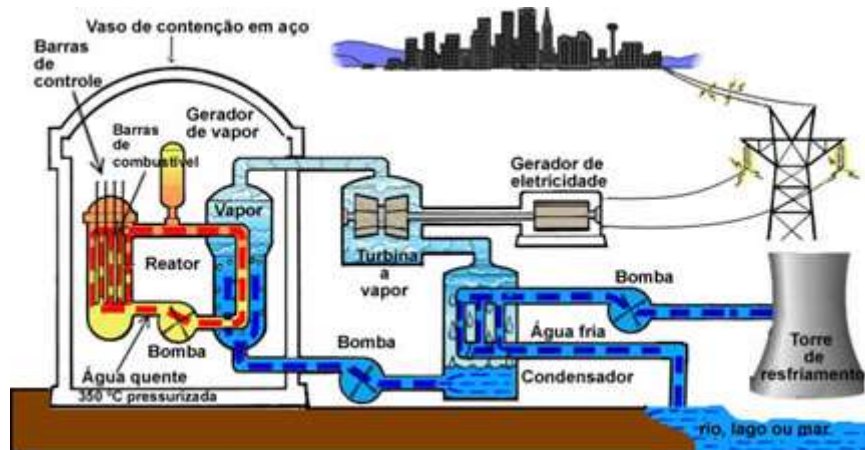
Após o procedimento anterior, a geração de vapor ocorre do lado secundário de trocadores de calor em forma de U de passo único, normalmente denominados de geradores de vapor, dependendo da usina poderá haver de dois a quatro geradores de vapor, que pode ser uma desvantagem em relação a reatores BWR de ciclo direto quando falamos em transferência de calor, como o circuito secundário é independente do primário oferece uma grande vantagem em relação ao reator PWR, pois oferecem uma barreira entre o material radioativo e o meio ambiente. (IAEA, 2014)

Afim de estabelecer alta pressão no sistema primário para evitar vaporização da água, o reator PWR possui um alto custo causado por suas características estruturais do seu sistema primário, do vaso reator. Um reator PWR exige componentes específicos como o pressurizador e os geradores de vapor aumentando os custos das usinas que utilizam este tipo de reator quando comparado ao tipo de reator BWR de ciclo direto. (SANTOS, 2015)

O combustível utilizado para este tipo de reator é o urânio enriquecido (em torno de 4% de U-235) devido à alta absorção de nêutrons pela água leve, pois devido a esse fato, fica inviável para países que não dominam o enriquecimento de urânio, apenas países que possuem essa tecnologia de enriquecer o urânio podem desfrutar destes reatores sem a necessidade de importar, se torna mais atrativa aos países como o Brasil que domina o

enriquecimento isotópico de urânio, o reator é considerado compacto em função do enriquecimento do combustível e da alta densidade de potência existente. (SANTOS, 2015). A Figura 6 exemplifica o funcionamento de um reator PWR, demonstrando cada circuito.

Figura 6- Reator PWR



Fonte: (IAEA, 2021)

3.2.2 Reator de Água Fervente (BWR)

Esta linha de reatores, que utiliza urânio levemente enriquecido e água leve fervente, foi desenvolvida nos EUA, tendo a primeira central deste tipo funcionando em 1956, entretanto a primeira central industrial deste tipo de reator só forneceu energia elétrica, regularmente a partir de 1960.

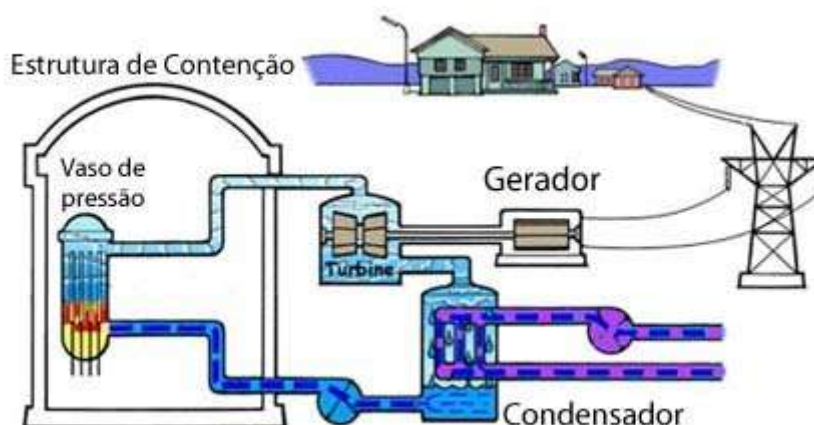
Hoje tem-se cerca de 65 reatores do tipo BWR em operação no mundo (IAEA,2020), esses tipos de reator são compactos, admitindo valores elevados para densidade de potência, trabalham com o fluido de refrigerante sob pressão moderada na ordem de 70 ATM, podem ser em grande parte pré-fabricados e transportados ao local de construção da central, são geralmente construídas para funcionar com ciclo direto de vapor. (SANTOS, 2015)

Os reatores BWR, diferentemente do tipo PWR, onde a água não entra em estado de ebulição devido sua alta pressão em que ela se encontra, do tipo BWR trabalham com uma pressão menor, com a retirada de calor ocorre através da vaporização da água ao entrar em contato com o núcleo do reator, pois é classificado com ciclo direto de vapor, contaminando suas turbinas e acessórios com radioatividade, como é esse mesmo o vapor que gira as turbinas, os reatores de ciclo indireto são aqueles que há um gerador onde é realizada a transferência de calor do estágio primário para o estágio secundário, com esse vapor que gira

as turbinas, faz-se com que a um custo mais baixo em relação aos reatores do tipo PWR, onde diversos equipamentos de segurança são eliminadas ou tem suas especificações minimizadas. (SANTOS, 2015)

Características similares tanto da PWR quanto da BWR é que as duas utilizam água leve tanto como moderador quanto refrigerante e o combustível usado é o urânio enriquecido, apesar da pressão no sistema primário ser menor que a utilizada nos reatores PWR, a pressão e a temperatura do vapor gerado são similares, porém diferentemente dos reatores PWR, as barras de controle são montadas na parte inferior do vaso reator, tal configuração se deve ao fato de existirem separadores e secadores de vapor na parte superior do vaso do reator, isso faz com que impossibilite fisicamente a montagem das barras pela parte superior. (SANTOS, 2015). A Figura 7 demonstra um esquemático do funcionamento do reator BWR.

Figura 7- Reator BWR



Fonte: (IAEA, 2021)

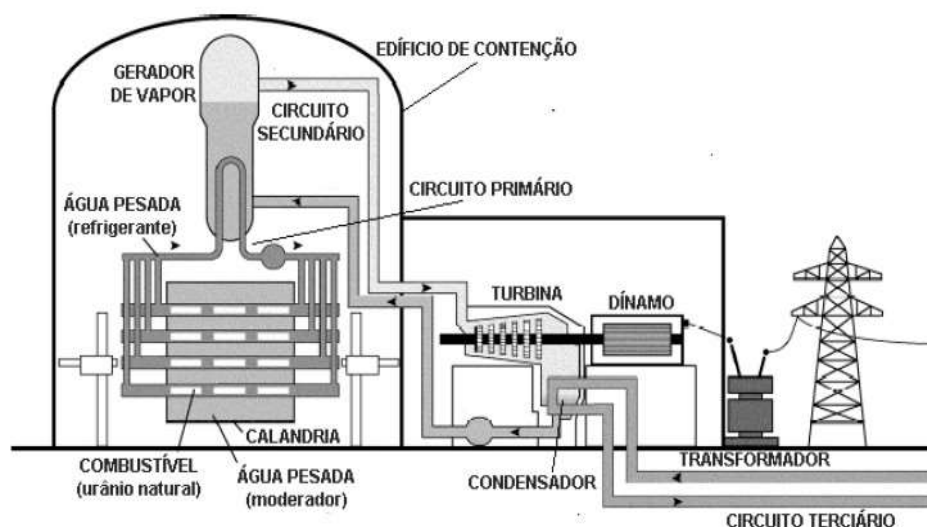
3.2.3 Reator de Água Pesada (HWR ou PHWR)

Os reatores moderados e refrigerados de água pesada podem ser abastecidos com urânio natural e apresentam boa economia com de nêutrons, esse modelo de reator utiliza o mesmo princípio básico dos reatores PWR, se tratando da tecnologia dos reatores HWR eles aceitam diferente tipos de refrigerantes, podendo ser refrigerados a água, à gás ou a fluido orgânico, o principal diferencial desse reator é a utilização de deutério como moderador ao invés de água leve como é utilizada nos reatores do tipo PWR e BWR. Fazendo com que seja possível a utilização de urânio natural como combustível ao invés do enriquecido, tornando viável para países que não dominam a tecnologia de enriquecimento de urânio. Neste sentido

o deutério possui melhores características moderadoras de nêutrons quando utilizados em reatores de urânio natural ou baixo enriquecimento, por outro lado o custo de produção do deutério é elevado. (SANTOS, 2015)

O reator HWR, diferentemente na parte estrutural do tipo PWR e BWR, tem uma constituição horizontal na qual o núcleo fica em uma calandria e o combustível fica em tubos de pressão horizontais, com isso este tipo de reator permite o reabastecimento do combustível com a usina em operação, tal procedimento é feito através de dois equipamentos localizados um em cada lado da calandria, enquanto um é reabastecido de combustível novo no tubo de pressão, outro equipamento do lado remove o combustível velho. (SANTOS, 2015). A Figura 8 demonstra o esquemático do funcionamento do Reator HWR.

Figura 8- Reator HWR



Fonte: (IAEA, 2021)

3.2.4. Reator Refrigerado a Gás (GCR)

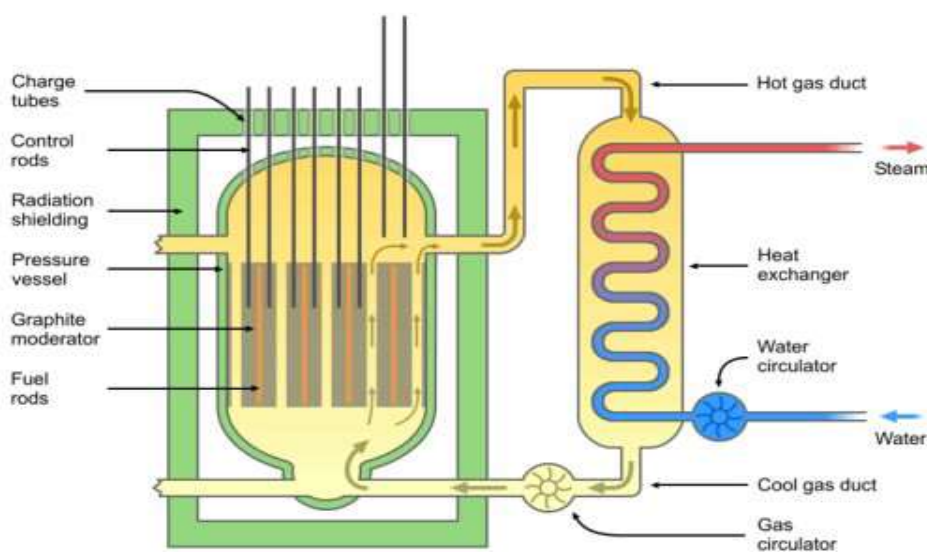
Os reatores do tipo GCR, usam grafita como moderador e com baixo custo devido a utilização de CO₂ com gás refrigerante, com isso tem-se maior facilidade e segurança no manuseio do gás refrigerante (CO₂), assim como o reator do tipo HWR, o GCR também pode fazer o reabastecimento com a usina em operação, com a utilização do urânio natural, reduz-se o custo com enriquecimento do mesmo. (SANTOS, 2015)

Porém, como o gás CO₂ possui baixa eficiência na transferência de calor, deverá ser bombeado com alta pressão, necessitando de grandes compressores que consomem uma parte

considerável da energia produzida, além de possuir características estruturais do reator que faz uso tanto do urânio natural e grafite é relativamente grande. (SANTOS, 2015)

Há alguns países como a França, Inglaterra Alemanha e Estados Unidos foram atraídos por essa tecnologia, pela ausência da necessidade de enriquecimento do urânio. Hoje aproximadamente 14 reatores do tipo GCR estão em operação no mundo. (PRIS, 2020). A Figura 9 apresenta o funcionamento do Reator Refrigerado a Gás.

Figura 9- Reator Refrigerado a Gás (GCR)



Fonte: (IAEA, 2021)

3.2.5. Reator Regenerador Rápido (FBR)

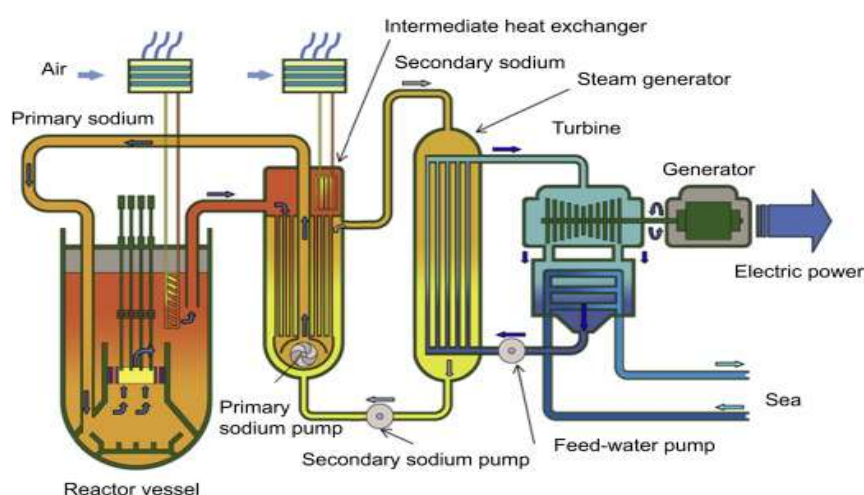
São reatores que utilizam a fissão provocada por nêutrons de alta energia. Com isto, têm por principal característica a ausência do elemento moderador. Como decorrência imediata, surge a possibilidade de serem alcançadas densidades de potência muito mais elevadas que em qualquer dos tipos precedentes. Por outro lado, a tecnologia dos reatores rápidos é extremamente complexa. (SANTOS, 2015)

O reator FBR é projetado para produzir mais material físsil do que está sendo consumido para gerar calor, com isso usa-se o plutônio físsil (Pu-239 e Pu-241) e U-238 fértil como combustível com um espectro de nêutrons rápidos são mais efetivos. O Reator Regenerador Rápido de Metal Líquido (LMFBR) possibilita a manutenção da alta energia dos nêutrons já que o sódio líquido usado como refrigerante não possui boas propriedades como

moderador, então, com a baixa absorção neutrônica pelos produtos de fissão permite que se consiga elevada queima de combustível. (SANTOS, 2015)

Os reatores do tipo FBR operaram experimentalmente nos EUA em meados de 1950 e posteriormente com seus protótipos na Europa Ocidental a utilização mais recente tem ocorrido na Rússia e na China onde existem atualmente 3 reatores em operação. (PRIS, 2020). O diagrama esquemático do Reator Regenerador Rápido está sendo exemplificado na Figura 10.

Figura 10- Reator Regenerador Rápido (FBR)



Fonte: (IAEA, 2021)

3.2.6. Reatores Híbridos.

Esse tipo de reator está em fase de estudo atualmente, pois eles permitem encurtar a meia vida dos rejeitos de alta atividade, esses reatores terão a capacidade de gerar energia e incinerar os resíduos, transformando o lixo radioativo para reduzir consideravelmente o seu ciclo de vida. (ABIDES, 2010)

Com o conceito na utilização de um reator rápido acoplado a um acelerador de partículas, o sistema utiliza a tecnologia de transmutação, possibilitando reduzir de milhares de anos para cerca de 250 anos o tempo de vida do lixo de alta atividade. O presidente da INB afirma que, “Com o aumento da idade média do ser humano, daqui a pouco esse tempo corresponderá a apenas três gerações, um prazo totalmente aceitável sob o ponto de vista do controle”. (ABIDES, 2010)

3.2.7. Reator Nuclear de Geração IV

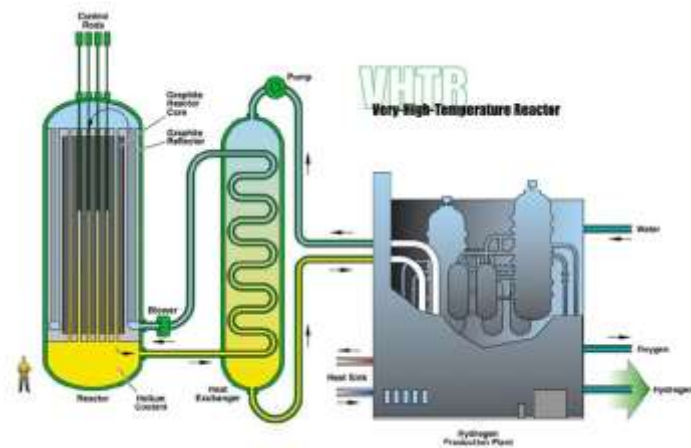
Em 2000 foi proposto pela ONU a busca de um novo padrão de reatores nucleares, que passaram a ser designados de reatores nucleares de geração IV. Estes reatores, que se espera sejam desenvolvidos até 2030, deverá atender a padrões de segurança que impossibilitem a proliferação de armas nucleares, mantendo-se economicamente competitivos economicamente e atendendo a novos conceitos ecológicos, esse foi alguns objetivos tecnológicos que foram propostos pelo Fórum Internacional da Quarta Geração (*GIF- Generation IV Internacional Forum*). (GIF Portal, 2021)

Nos próximos anos, as perspectivas tecnológicas relativas à energia nuclear serão dominadas pela consolidação da nova geração de reatores (IV) cujas primeiras unidades entraram em operação nos últimos dois anos, se espera o desenvolvimento e a implantação dos primeiros reatores pequenos modulares (SMR- *Small Modular Reactores*), atualmente em processo inicial de licenciamento em diversos países. Reatores da chamada geração IV ainda estão em fase de concepção, não sendo esperada uma entrada significativa dessa tecnologia no horizonte desse plano. Nas próximas décadas a expansão da geração de energia nuclear no mundo será baseada em modelos da Geração IV e SMRs.(PNE 2050, 2020)

No Brasil, a opção tecnológica foi por reatores a água pressurizada (PWR), a tecnologia mais adotada em todo o mundo, com mais de 60% das usinas em operação. Essa opção será mantida para Angra III e para novos projetos de usinas que sejam eventualmente definidos ao longo da década de 2020. Após 2030, novos projetos poderão se basear em tecnologias de PWR, SMR e reatores de quarta geração, caso essas últimas alcancem maturidade tecnológica e competitividade. (PNE2050, 2020)

Os reatores nucleares de geração IV, são um conjunto de projetos de reatores teóricos que estão sendo pesquisados conforme mostrado na Figura 11, os geradores em operação na atualidade, nada mais é do que geradores de segunda e terceira geração. (GIF Portal, 2021)

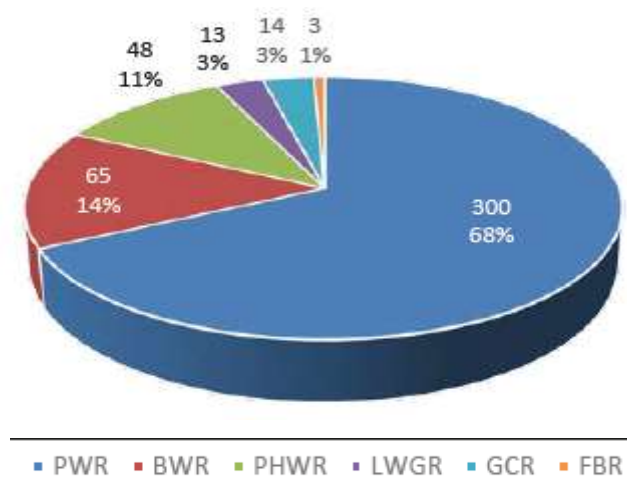
Figura 11- Exemplo de Reator de IV Geração.



Fonte: (IAEA, 2021)

Conforme vimos nos tópicos anteriores as particularidades de alguns dos principais reatores, vê-se na Figura 12 a quantidade de reatores que estão em operação no mundo.

Figura 12- Reatores em Operação.



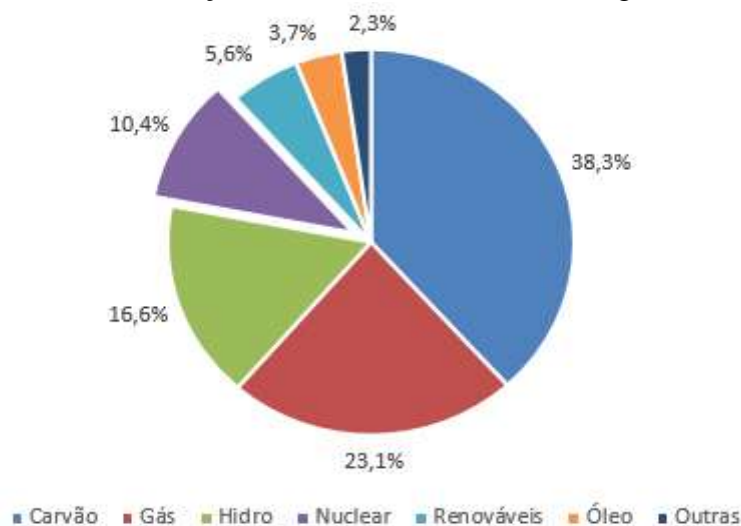
Fonte: (PRIS, 2021)

3.3 Panorama Mundial e Brasileiro

Dados da Associação Nuclear Mundial no ano de 2022, informa que existem 441 reatores nucleares em operação no mundo, com capacidade instalada de aproximadamente 400 mWe, conforme o relatório *Electricity Information* que foi publicado pela *International Energy Agency* (IEA) em 2022 os reatores foram responsáveis por 10,4% da produção de

energia elétrica no mundo, enquanto as usinas térmicas e convencionais como a de Carvão, Combustíveis Líquidos e Gás Natural contribuíram com 65,1% da geração total, usinas hidrelétricas um total de 16,6% e pôr fim a geração de energia por fontes renováveis foi de 5,6% no total, conforme vê-se na Figura 13. (ELETRONUCLEAR, 2020)

Figura 13- Contribuição de cada fonte na matriz energética mundial.



Fonte:(Eletronuclear, 2020)

Para países como França, Canadá, Estados Unidos, Japão, Coreia do Sul, Reino Unido e o Brasil pretendem construir novos reatores, com a ascensão de fontes alternativas e limpas como a energia eólica e solar fez com que ampliasse o leque de opções, mas as usinas nucleares continuam sendo sinônimo de energia limpa para muitos países pelo fato de não emitirem GEE (Gás de Efeito Estufa) (AIEA, 2020)

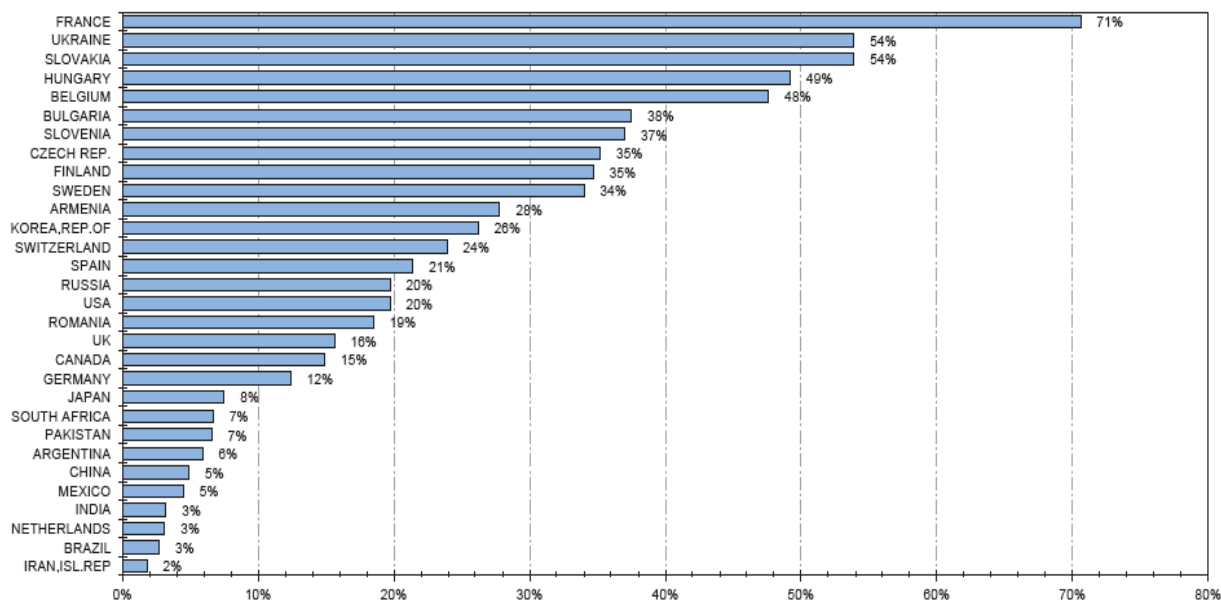
Os reatores nucleares evitaram nos últimos 50 anos uma descarga de 60 gigatoneladas de CO₂ na atmosfera, o que justifica o posicionamento da França quanto as usinas nucleares, ora a favor, ora neutro, sendo que o país é o segundo maior gerador de eletricidade a partir delas, ficando atrás dos Estados Unidos. (AIEA, 2020)

Nos últimos anos os Estados Unidos foi o país que mais gerou energia elétrica por fonte nuclear, cerca de 32% da produção total deste tipo de energia no mundo, destaca-se em seguida a França com 17,32%, logo em seguida tem-se a China, Japão, Rússia e entre outras, o Brasil é responsável por cerca de 0,58% da geração de energia por fonte nuclear no mundo. (AIEA,2020)

Segundo dados da AIEA PRIS divulgado em seu site oficial até o ano de 2020, os Estados Unidos possuem cerca de 93 unidades de geração de energia termonuclear a França

vem em seguida com 56 unidades e a até então é a nação com maior dependência da energia termonuclear com 71% de sua energia total produzida conforme pode-se ver na Figura 14 a participação nuclear na geração de eletricidade. (AIEA,2020)

Figura 14- Participação Nuclear em Geração de Eletricidade.



Fonte: (IEMA, 2021)

A Tabela 4 indica a quantidade de reatores ativos e a potência gerada em algumas nações. (AIEA, 2021)

Tabela 4 Países com o maior número de centrais nucleares e potência instalada.

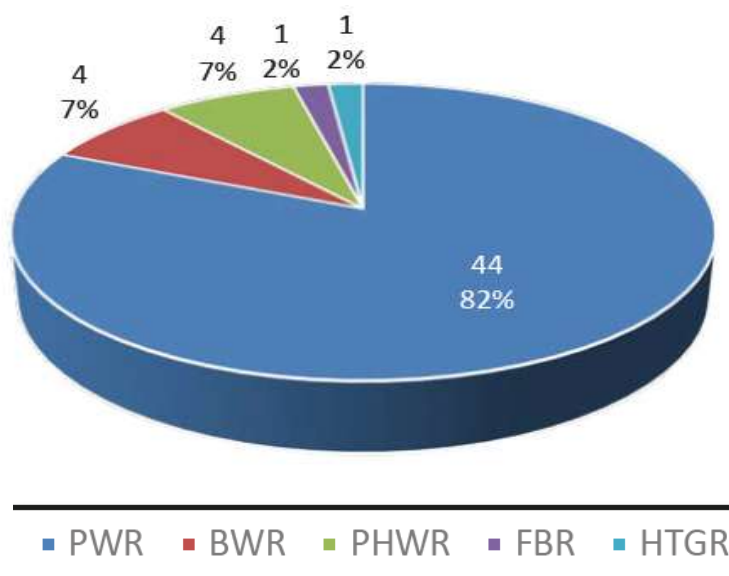
	País	Unidades	MW
1ª	Estados Unidos	93	95,52
2ª	França	56	61,37
3ª	China	52	49,59
4ª	Japão	33	31,68
5ª	Rússia	38	28,58
6ª	Coreia do Sul	24	23,15
7ª	Canadá	19	13,62
8ª	Ucrânia	15	13,11
9ª	Alemanha	6	8,11
10ª	Reino Unido	12	7,34
22ª	Brasil	2	2,09
	Total	441	398,2

Fonte: (IAEA, 2021)

Existem cerca de 16 países que representam a metade da população mundial que estão construindo 53 novos reatores com a capacidade total de 57,5 GWe e atualmente 65 países

que não possuem essa tecnologia nuclear expressam junto a AIEA seu interesse na questão, as potências mundiais querem multiplicar o número de usinas em seu território. (ELETRONUCLEAR, 2020). A Figura 15 informar a quantidade de reatores por tipos que estão sendo construídos no mundo.

Figura 15- Reatores Nuclear em Construção por Tipo.



Fonte: (IAEA, 2021)

Vale ressaltar que se observa uma tendência internacional de construção em paralelo de duas usinas lado a lado o que contribui para economias no custo de construção, pelo uso compartilhado de toda a infraestrutura de canteiro e mão de obra, bem como para a evolução ao longo da curva de aprendizagem. Isso consiste na aplicação do conceito de construção de reatores em série. (PNE 2050, 2020)

Projeções da IAEA quanto ao futuro da energia nuclear em relação aos cenários dos anos anteriores é de cerca de 8% maiores, chegando até 530 GW a capacidade total instalado até 2050 no caso de menor crescimento e de até 792 GW para um alto crescimento, podendo chegar a mais do que o dobro da produção atual. (IAEA, 2020). Esse aumento das perspectivas não representa ainda uma nova tendência, mas ocorre em um momento em que o mundo quer afastar-se das energias fósseis para combater as ações climáticas como o temido aquecimento global, seria uma alternativa às oscilações do preço dos produtos energéticos, a expansão da energia nuclear em todo o mundo requer que os governos atuem com responsabilidade e critérios de segurança rígidos.

Atualmente a energia nuclear é a segunda maior fonte de energia de baixo carbono no mundo, atrás apenas da hidroeletricidade. Ainda que, seja imediatamente associada à geração

de eletricidade (seu uso comercial em maior escala), tem um amplo leque de produtos e serviços relevantes para outros setores, tais como: medicina nuclear, radioisótopos, irradiação de alimentos, controle de pragas, monitoramento de erosão de solos, marcadores industriais, fornecimento de vapor residual (calor de processo), dessalinização, geração de hidrogênio, defesa (submarino com propulsão nuclear), etc. (PNE 2050, 2020)

Apesar da ocorrência restrita de eventos de falhas e danos associados ao uso dessa tecnologia, pode-se observar a ampliação das regulações de segurança de construção e a operação de usinas termonucleares em todo mundo. Por um lado, existe uma comunidade internacional voltada ao aprimoramento regulatório e à fiscalização mútua entre países, observa-se um crescente aperfeiçoamento da gestão operacional das usinas. Além disso, a tecnologia de reatores e de segurança das usinas teve significativa evolução. Ainda cabe citar a perspectiva de continuidade da evolução tecnológica durante as próximas décadas, abarcando as dimensões de segurança, eficiência e adaptação à operação conjunta às fontes variáveis. Por outro lado, a complexidade dos novos projetos e as novas normas de segurança e licenciamento resultaram na ampliação do tempo de construção e ao crescimento dos custos de investimento de novos projetos termonucleares. Porém, tais condicionantes também conduziram os projetos termonucleares a custos efetivos de projeto superiores aos previstos, dificultando o acesso ao financiamento para novos projetos de energia nuclear. (PNE 2050, 2020)

Atualmente, o setor elétrico também tem assistido em todo o mundo a um processo de inovações tecnológicas na geração elétrica a fontes renováveis como a eólica, a solar e a biomassa (incluindo biogás, biometano e rejeitos sólidos urbanos), bem como em armazenamento de energia. Esses fatos acrescentam pressão competitiva sobre novos empreendimentos termonucleares, face aos custos associados às respectivas tecnologias, mas também trouxeram oportunidades para a indústria nuclear, ao oferecer uma alternativa de atendimento da demanda dos sistemas elétricos por capacidade. Assim, quando mercados de capacidade e de carbono forem estruturados (o que já ocorre em alguns países), as usinas termonucleares poderão vender serviços de capacidade e de abatimento de carbono, o que contribuirá para melhorar as análises custo-benefício de novos empreendimentos. O mesmo se aplica a toda a cadeia industrial nuclear, sendo necessário desenvolver e ampliar outros mercados associados à tecnologia nuclear como medicina nuclear, radioisótopos, controle de pragas, irradiação de alimentos, marcadores de erosão, defesa (submarino com propulsão nuclear), dessalinização, geração de hidrogênio e entre outras aplicações. (PNE 2050, 2020)

No Brasil, esses fatores condicionantes internacionais também ocorrem, tornando desafiadora a expansão termonuclear e a consolidação de um complexo industrial que proveesse os amplos serviços da tecnologia nuclear. Apesar do Brasil possui consideráveis recursos de urânio, ainda que grande parte do território nacional não tenha sido prospectado. O País domina toda a tecnologia do ciclo do combustível nuclear, desde a mineração até a montagem do elemento combustível. Atualmente, se desenvolvem no Brasil pesquisas em reatores e aplicações da energia nuclear, tais como o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) e o submarino com propulsão nuclear (SN-BR). (PNE 2050, 2020)

No Brasil a produção de eletricidade a partir da energia nuclear está limitada até o presente momento entre as Usinas de Angra 1 e Angra 2, onde Angra 1 está operando desde o ano de 1985 com uma potência de 640 MWe, energia suficiente para suprir capitais com a população de 1 milhão de habitantes como Porto Alegre e São Luís, ao longo do tempo Angra 1 enfrentou problemas com alguns equipamentos o que prejudicou o funcionamento da usina, porém em meados da década de 90 foram sanadas. (ELETRONUCLEAR, 2020)

Com obras paradas tem-se Angra III com potência de 1405 MWe energia suficiente para abastecer 4,5 milhões de pessoas, com previsão de início da operação comercial em janeiro de 2026, em breve será retomada, com o “Plano de Aceleração do Caminho Crítico” avançou com a licitação para contratar a empresa responsável.(Eletronuclear, 2022) Apesar dos condicionantes desafiadores para a geração termonuclear no mundo e no Brasil, com incertezas sobre o aproveitamento de seu potencial, há também novas perspectivas para a energia nuclear associadas a seu papel em um cenário com significativa restrição de carbono e alta participação de fontes renováveis não despacháveis, bem como ao desenvolvimento de novos negócios (inclusive no setor elétrico) e outras aplicações da tecnologia nuclear. (PNE 2050, 2020)

4 ASPECTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS.

Neste capítulo foi realizada a proposta de critério ambiental quanto a emissão de gases de efeito estufa, esclarecimento quanto aos seus resíduos e rejeitos radioativos, informações sobre a escala de acidente nuclear, e os três principais acidentes que já ocorreram nos últimos anos, os principais desafios que a energia nuclear terá que esclarecer perante a sociedade de forma transparente, informando o funcionamento de seus reatores em operação no Brasil na geração de energia elétrica e será feita uma análise econômica com a energia nuclear e algumas fontes primárias que integram o SIN (Sistema Interligado Nacional) .

4.1. Aspectos Ambientais

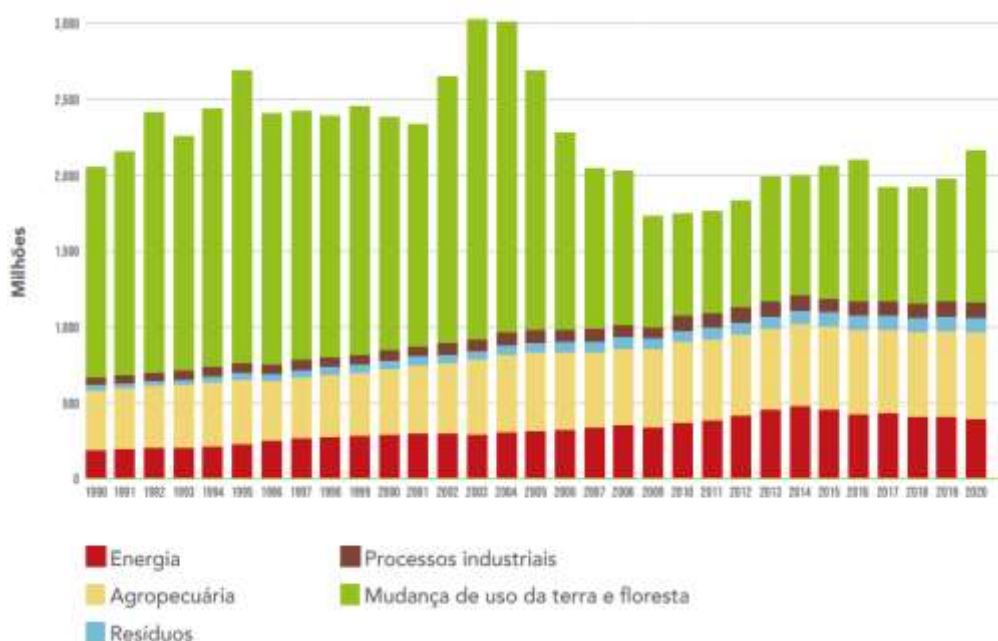
A geração nuclear tem a vantagem de não emitir Gases de Efeito Estufa (GEE). As termelétricas que utilizam combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e gás natural emitem excessivas quantidades de dióxido de carbono. O gás natural é considerado o combustível fóssil menos agressivo ao meio ambiente, quando comparado ao carvão mineral ou ao óleo combustível, comumente utilizados nas termoelétricas. Com a baixa presença de contaminantes em sua composição e da elevada eficiência dos processos atuais de geração de energia, ele emite menor quantidade de GEE e poluentes atmosféricos, além de não oferecer riscos diretos de contaminação de recursos hídricos. Porém, sua natureza gasosa também reduz os riscos ambientais associados ao transporte e gerenciamento do combustível, que não precisa ser estocado e se dispersa rapidamente no ambiente em caso de vazamento. As termoelétricas que utilizam carvão mineral como combustível são as que mais possuem como principais aspectos como impactos ambientais a emissão de GEE e poluentes atmosféricos. (EPE, 2019)

Portanto, a falta de informação e conhecimento de energia nuclear gera grande preconceito do ponto de vista ambiental, sendo gerenciada adequadamente a energia nuclear é uma energia limpa, não emite gás poluente para a atmosfera durante o processo de geração de energia.

No ano de 2020 período da pandemia, teve um aumento de 9,5% das emissões brutas de gases de efeito estufa no Brasil, sendo que foi o ano que a pandemia da Covid-19 para a economia mundial, causando uma inédita redução global em quase 7%, porém, o Brasil foi na contramão do resto do mundo, tornando-se possivelmente o único emissor do planeta a ter alta

chegando a atingir emissões brutas em 2,16 bilhões de toneladas de CO₂, porém em 2019 foi 1,97 bilhões de toneladas, conforme pode-se verificar na Figura 16 a emissão de gases por setor. (IEMA, 2021)

Figura 16- Emissões de Gases de Efeito Estufa do Brasil de 1990 a 2020.



Fonte: (IEMA, 2021)

Visto que, o desmatamento da Amazônia e no Cerrado é o principal fator a elevação, os GEE lançados na atmosfera pelas mudanças do uso da terra aumentam consideravelmente 23,6%, o que mais obteve queda foi no setor de energia, que na esteira da pandemia e da estagnação econômica viu suas emissões regressarem. As mudanças de uso da terra foram também responsáveis pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, chegando a um total de 46% do total bruto ou 998 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO_{2e}), quando se considera as emissões líquidas descontando as remoções (sequestro de carbono) por florestas secundárias e em áreas protegidas e terras indígenas, essa participação cai para 24% (362 MtCO_{2e}). Na sequência vêm a agropecuária, o setor de energia e os setores industriais quase empatados com o setor de resíduos, conforme pode-se verificar na Figura 17.

Figura 17- Emissões de GEE no Brasil 2019 e 2020 (tCO₂e)

SETORES	2019	%	2020	%	VARIAÇÃO 2019-2020
Agropecuária	562.987.702	29%	577.022.998	27%	2,5%
Energia	412.466.747	21%	393.705.260	18%	-4,5%
Processos Industriais	99.472.616	5%	99.964.389	5%	0,5%
Resíduos	90.399.714	5%	92.047.812	4%	1,8%
Mudança de Uso da Terra e Floresta	806.996.124	41%	997.923.296	46%	23,7%
Total Emissões Brutas	1.972.322.903		2.160.663.755		9,5%
Total Emissões Líquidas	1.336.613.309		1.524.954.161		14,1%

Fonte: (IEMA, 2021)

Assim como os demais países dos G20, o Brasil também é um grande emissor de GEE, todos têm a responsabilidade pela forte redução de emissões necessária para cumprir o objetivo do Acordo de Paris, que é estabilizar o aquecimento da Terra em 1,5°C neste século. Para que isso ocorra, segundo o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), é estreita, o mundo precisará derrubar suas emissões em 7,6% ao ano todos os anos entre 2021 e 2030. A IEA (Agência Internacional de Energia), em seu *World Energy Outlook 2021*, estimou em 14 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente o total de emissões que precisam ser abatidas em 2030 para que o mundo entre na trajetória de 1,5°C, atualmente, as metas nacionais colocadas na mesa nos levam na direção dos 2,7°C. (IEA, 2021)

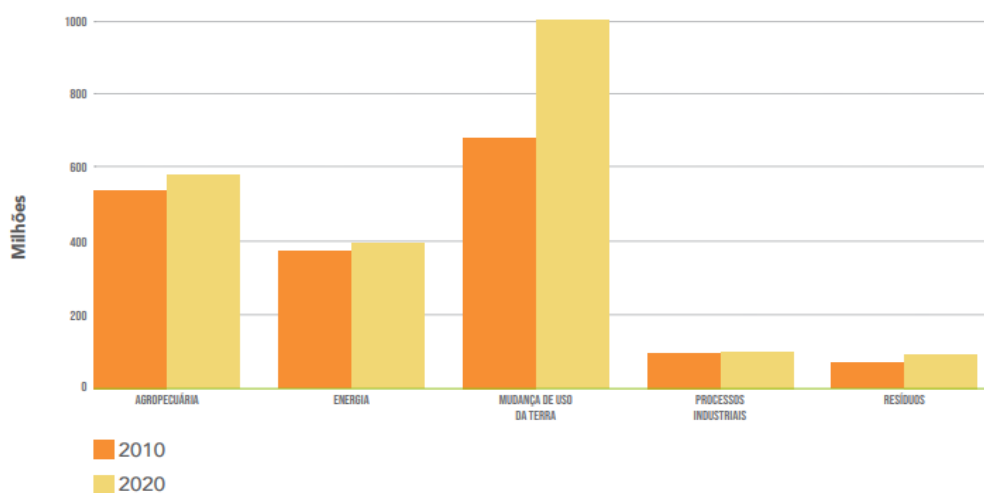
Portanto, aumentar sobremaneira a ambição das ações de redução de emissões para evitar os piores efeitos da mudança do clima. E os dados do SEEG mostram que o Brasil está no caminho inverso. Mesmo com um tombo na economia o PIB em 2020 teve uma retração de 4,1%, as emissões de GEE sofreram uma aceleração, a maior alta percentual desde 2003. No ano passado, o país ficou mais pobre e poluiu mais. No mês de maio de 2020, o SEEG publicou uma análise inédita das emissões do Brasil na pandemia, a estimativa geral era de que o país fosse aumentar a quantidade de gases de efeito estufa que lança na atmosfera em 10% a 20% naquele ano. A previsão se mostrou essencialmente correta, devido ao comportamento dos cinco setores avaliados como já demonstrado na figura 17. (IEMA, 2021)

O setor de energia teve uma redução forte nas emissões, de 4,5%, em especial devido à recessão e ao isolamento social no primeiro semestre, que derrubaram o consumo de gasolina no transporte de passageiros. O consumo de eletricidade também se manteve estável, com uma pequena redução, mas as chuvas próximas da média mantiveram as hidrelétricas operando enquanto mais renováveis entravam na matriz, o que reduziu as emissões. (IEMA, 2021)

A curva das emissões nacionais ainda é idêntica à de antes da adoção da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), 11 anos atrás. A expectativa era que, ao cumprir as metas da política – como a redução em 80% da taxa de desmatamento na Amazônia em 2020 em relação à média verificada entre 1996 e 2005, o país fosse ficar com uma curva de emissões mais parecida com as das nações industrializadas, dominada pelo setor de energia. (IEMA, 2021)

Isso não ocorreu, porém, a meta de 2020 foi cumprida no seu limite menos ambicioso, mas fracassou na componente de desmatamento, o oposto se verificou, após a recessão de 2015, a curva de emissões do setor de energia passou mostrar tendência geral de queda, em parte por um motivo ruim, a estagnação econômica, mas em parte também por uma boa novidade, a entrada crescente de energias renováveis na matriz. (IEMA, 2021). A Figura 18 demonstra as emissões de gases de cada setor da economia.

Figura 18- Emissões brasileiras por setor, antes e depois do PNMC.



Fonte: (IEMA, 2021)

As emissões de GEE do setor de energia são provenientes da queima de combustíveis em atividades como transportes, indústria e geração de eletricidade, além das chamadas emissões fugitivas, causadas pelo escape de GEE durante a produção de combustíveis como a fuga de metano na exploração de petróleo e gás natural. Em 2020, observa-se na Figura 19 que esse setor totalizou 393,7 milhões de toneladas de CO₂e emitidas, o que representa uma queda de 4,6% em relação a 2019, bem como o menor valor observado para o setor desde 2011. (IEMA, 2021)

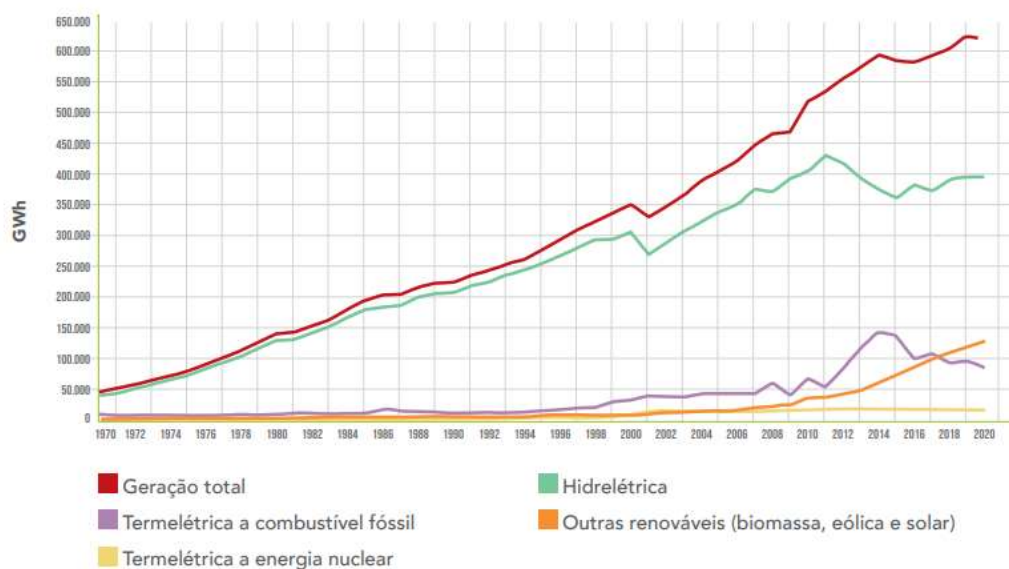
Figura 19 - Emissões de GEE no setor de Energia(1970- 2020)



Fonte: (IEMA, 2021)

A maior queda percentual ocorreu no subsetor de geração de eletricidade, em que reúne as emissões provenientes da queima de combustíveis em usinas termelétricas, e o total emitido em tal atividade caiu quase 11% de 2019 para 2020. Em 2020, mesmo na pandemia, a demanda por eletricidade no Brasil se manteve estável, com variação de apenas -0,8% em relação ao ano anterior. A quantidade de eletricidade gerada via hidrelétricas se manteve constante (-0,4%), enquanto outras fontes renováveis tiveram, ao todo, sua geração expandida em 7,6%. Com isso, foi possível diminuir em 11,1% a geração termelétrica a combustível fóssil que além de emissora é mais cara. A alta queda da eletricidade gerada via carvão mineral pode ser analisada na Figura 20, fonte das mais custosas e de maior intensidade de carbono: entre 2019 e 2020, o carvão gerou 22,1% menos. (IEMA,2021).

Figura 20- Geração de Eletricidade por Fonte (1970-2020)



Fonte: (IEMA, 2021)

Se comparado com fontes que utilizam petróleo ou carvão como matéria prima, o rendimento da usina nuclear é superior. Segundo Dr. James Lovelock “Um quilo de urânio tem a eficiência em produzir aproximadamente 10 milhões de vezes mais energia que a mesma quantidade de carvão ou petróleo”. Isso quantifica os verdadeiros benefícios ambientais dessa matriz energética. (MONTAVÃO, 2012)

Ente as fontes térmicas disponíveis para a geração de energia elétrica em grande escala, o urânio aparece como a fonte que obtém o maior conteúdo energético por quilograma de material. Isso se resume a um menor custo de produção quando comparada aos custos de todas as outras fontes térmicas. Apenas as fontes que utilizam gás natural não seguem essa regra pois, os custos de produção se equivalem. A Tabela 5 relaciona o tipo de fonte térmica com o potencial calorífico que ela pode gerar. (MONTAVÃO, 2012)

Tabela 5- Fonte Térmica X Potencial Calorífico.

Combustível		Pode Produzir Aproximadamente
1KG de Madeira		2 KWh
1kG de Carvão		3 KWh
1kg de Óleo		4 KWh
1m ³ de gás natural		6 KWr
1Kg de Urânio	Usina Nuclear Tipo PWR	60.000 KWh
	Usina Nuclear Tipo FBR	3.000.000 KWh

Fonte: (MRS Estudos Ambientais, 2004)

Com um dos maiores potenciais hídricos do país, a Amazônia tem cerca de 43% do potencial hídrico nacional, porém, a grande desvantagem é que nesta região abrange tanto o Norte quanto o Centro-Oeste do país, os rios têm o fluxo de água intenso e o terreno é plano com pouca presença de deltas, fazendo com que uma imensa área seja inundada caso construa uma usina hidrelétrica. Com isso teria grandes consequências como a desapropriação de grandes extensões de terras, o remanejamento dos nativos da região afetada e a perda ou até mesmo em último caso a extinção de riquezas biológicas que só existem na Floresta Amazônica, assim a formação de grandes reservatórios certamente iria trazer fortes consequências negativas para o meio ambiente. (MRS Estudos Ambientais, 2004)

Um estudo elaborado pela (MRS Estudos Ambientais) quanto a esses aspectos, usinas que utilizam fontes não renováveis são mais favoráveis, no sentido que ocupam áreas menores ou não ocorram, além da proximidade aos centros de consumo com economia em termos de linhas de transmissão. Segue Tabela 6 que informa a relação entre os tipos de fonte de energia e a área física que cada uma pode ocupar em alqueire.

Tabela 6- Fonte de Energia X Área Física (ha) .

Fonte de Energia	Tipo de Usina	Área necessária (ha)
Renovável	Hidrelétrica	25.000
	Energia Fotovoltaica	5000
	Energia Eólica	10.000
	Biomassa plantada	400.000
Não Renovável	Óleo e carvão	100
	Nuclear e Gás Natural	50

Fonte: (MSR Estudos Ambientais, 2004)

Diante deste cenário demonstrado até o presente momento, fica claro que o ponto de vista dos impactos ambientais relacionados ao total de emissões de GEE, a geração de eletricidade por fonte nuclear é uma das que causa menos impactos, porém, nesse sentido faz-se necessário reavaliar as atividades de mineração e prospecção de combustível. A cadeia de geração nuclear poderia ser classificada entre os empreendimentos considerados sustentáveis por não emitirem poluentes na atmosfera quando comparada às outras fontes.

4.2. Resíduos Radioativos.

A gestão dos resíduos radioativos é sem dúvida um dos mais relevantes, seja ele em caráter geral ou específico no Sistema Elétrico Brasileiro, de forma que os resíduos radioativos muito das vezes são classificados como rejeitos radioativos, o material que sobra

como consequência do uso de material nuclear para produção de eletricidade, diagnóstico e tratamento de doenças ou outras finalidades, sendo os resíduos normalmente categorizados como rejeitos radioativos de alta, média e baixa atividade. (SANTOS, 2015)

Os rejeitos de baixa e média atividade são de origem das usinas nucleares e da utilização de radioisótopos na medicina, na indústria e em pesquisa, e precisam ser mantidos separados por prazo inferior a 200 anos. Incluem itens que se tornaram contaminados com material radioativo ou se tornaram radioativos através de exposição à radiação neutrônica e podem incluir itens contaminados radioativamente como roupas de proteção contra contaminação, ferramentas contaminadas, filtros, resíduos do tratamento do líquido refrigerante do reator, seringas, agulhas de injeção, etc. (SANTOS, 2015)

Na ordem de grandeza do volume de resíduo radioativo de baixa atividade produzido, em 1998 nos Estados Unidos, o volume de resíduos de baixa atividade era de 1.419 m³. Neste volume estavam englobados resíduos produzidos nos processos comerciais e na produção de energia elétrica, sendo que deste total apenas 14,8% eram provenientes das usinas nucleares (cerca de 75 usinas). (Santos, 2015).

Os rejeitos radioativos de baixa e média atividade são armazenados em matriz de acordo com o nível de risco que apresentam e alguns são blindados com chumbo, concreto ou outro material visando proteger os trabalhadores e o público em geral. (SANTOS, 2015)

A indústria nuclear é uma das poucas atividades com interferência humana que tem capacidade para controlar totalmente os rejeitos que produz. Devido às características do material radioativo, a Eletrobrás Eletronuclear armazena e controla em tempo integral os rejeitos das usinas de Angra. (ELETRONUCLEAR, 2021)

Nos Estados Unidos para resíduos de baixa atividade, existem três depósitos comerciais, porém aceitam apenas resíduos de alguns estados e somente alguns resíduos de baixa atividade, o restante dos resíduos de baixa atividade que são produzidos, são armazenadas nas próprias instalações, como hospitais, institutos de pesquisa e usinas nucleares. (SANTOS, 2015)

Os rejeitos de alta atividade contemplam produtos de fissão e plutônio e que devem ser mantidos isolados por longos períodos. Tais rejeitos geram calor nos primeiros 30-50 anos, a categoria desses elementos combustíveis usados em reatores nucleares como rejeito radioativo é um assunto controverso mundialmente. No Brasil de acordo com a normativa existente, os elementos combustíveis usados não podem ser caracterizados como rejeito uma vez que ainda possuem valor agregado.

Os elementos combustíveis utilizados em reatores nucleares são altamente radioativos e potencialmente perigosos, uma vez que a proximidade de um elemento combustível irradiado e sem blindagem pode ser fatal em função do alto nível de radiação. Aproximadamente dez anos após um elemento combustível ser retirado do núcleo do reator, a dose de radiação a 1 metro de distância do mesmo é da ordem de 20.000 rem por hora, sendo que se considera que uma dose de 5.000 rem seja suficiente para causar imediata perda de capacidade e levar a morte em até sete dias. (IAEA, 2006)

Assim como nos EUA, em Angra I e Angra II os elementos combustíveis irradiados estão armazenados em piscinas localizadas nas próprias instalações das usinas nucleares onde foram utilizados. Esse tipo de armazenamento requer um dimensionamento das mesmas de forma que haja uma camada de água de no mínimo sete metros acima do topo dos elementos combustível, atuando como blindagem a radiação para qualquer pessoa que se aproximar da piscina. (SANTOS, 2015)

Se a capacidade de a piscina esgotar, é possível optar pelo armazenamento a seco dos elementos combustíveis irradiados utilizando-se cascos para armazenamento a seco, neste método o elemento combustível irradiado pode ser isolado em cascos metálicos ou feito de concreto com gás inerte. (SANTOS, 2015)

A Eletronuclear está em processo de implementação da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustível Irradiado (UAS) conforme vê-se na Figura 21. A estrutura armazenará os combustíveis usados de Angra 1 e 2. Esses combustíveis usados não são considerados rejeitos radioativos ou lixo nuclear, pois ainda contêm grande potencial energético, que pode ser reaproveitado por meio de reprocessamento. Países como Rússia, França e Japão reciclam esse material. A construção da UAS permitirá que os combustíveis usados sejam guardados com toda a segurança. (ELETRONUCLEAR, 2021)

A Eletronuclear escolheu um local dentro do sítio da central, localizado entre as usinas Angra 2 e 3, nas proximidades do Observatório Nuclear (ON). Porém, neste local já foi analisado para as condições geológicas e geotécnicas e o sítio de a já foi submetido a estudos meteorológico e hidrológico. A tecnologia é comprovadamente segura e de fácil implantação. Existem unidades do tipo em operação em vários países do mundo. Apenas nos Estados Unidos, há cerca de 90 instalações similares à UAS, sem qualquer registro de vazamento de material radioativo. (ELETRONUCLEAR, 2021)

Figura 21- Exemplo de uma instalação com módulos de armazenamento a seco.



Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2021)

A construção do UAS vem seguindo com rigor os padrões de segurança internacionais e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen), órgão regulador e fiscalizador do setor nuclear brasileiro. Além disso, segue à risca todas as normas de licenciamento ambiental do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). Também vem sendo acompanhada pelo Instituto Estadual do Ambiente (Inea) e pela prefeitura de Angra dos Reis. (ELETRONUCLEAR, 2021)

O sistema de armazenamento a seco com base em canisteres se caracteriza por ser um casco de metal em aço inoxidável, soldado, com capacidade de armazenar até 37 elementos combustíveis e dimensões aproximadas de 2,0 m de diâmetro, 4,6 m de altura e 25 mm espessura. Sua função principal é confinar todo o material radioativo no seu interior, garantir a os elementos combustíveis espaçados, para não provocar uma reação nuclear e permitir a troca de calor com o meio externo. (ELETRONUCLEAR, 2021)

Cada cânister é envolvido por um casco de transferência, constituído em aço carbono de 300 mm de espessura, que tem funções de blindagem radiológica e estabilidade estrutural durante as operações de carregamento, descarregamento e movimentação entre as piscinas das usinas e a UAS. Como a UAS está localizada dentro da central nuclear de Angra, não será necessário um esquema de segurança especial para a transferência. Os s com elementos combustíveis usados já serão retirados das usinas hermeticamente fechados, com as tampas soldadas. (ELETRONUCLEAR, 2021)

A UAS está sendo construída por empresa norte-americana Holtec, que é a maior especialista nesse tipo de projeto em todo o mundo, atuando no ramo de armazenamento de combustível irradiado desde 1986. A transferência dos elementos combustíveis usados

começou por Angra 2, no primeiro semestre de 2021. Em Angra 1, o procedimento está previsto para ser transferido no segundo semestre do mesmo ano. (ELETRONUCLEAR, 2020)

A UAS contará com 15 módulos. No total, 288 elementos combustíveis usados serão retirados de Angra 2 e 222, de Angra 1, o que abrirá espaço nas piscinas de armazenamento para mais cinco anos de operação de cada planta. O repositório poderá comportar até 72 módulos, com capacidade para armazenar combustível usado até 2045. (ELETRONUCLEAR, 2020)

Com cuidado na manipulação e armazenamento de rejeitos radioativos, a Eletrobrás Eletronuclear tem um programa de monitoramento permanente dos níveis de radiação do ar, da terra e da água em torno da CNAAA, que é acompanhado por universidades, institutos de pesquisa, IBAMA, CNEN e a Agência Internacional de Energia Atômica. Esse programa constatou que o funcionamento das usinas nucleares de Angra não alterou os níveis de radioatividade do meio ambiente. (ELETRONUCLEAR, 2021)

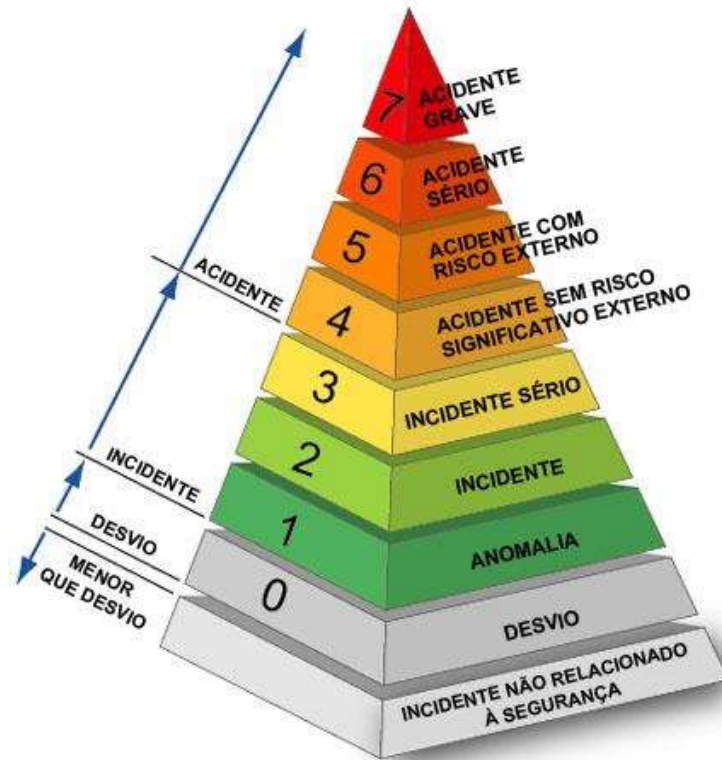
Pelo viés do ponto de vista ambiental, a geração de energia elétrica por fonte nuclear tem suas vantagens e desvantagens como qualquer outra fonte de geração. Contudo está a poder ter um papel estratégico no planejamento do SIN, por não ser dependente de questões climáticas.

4.3. Acidentes com Reatores Nucleares

Quando falamos de acidentes nucleares, existe uma tabela que é realizada a medição da gravidade dos impactos provocados pelo mesmo, a escala em que é chamada de Escala Internacional de Acidentes Nucleares (INES- International Nuclear Event Scale) o qual foi introduzida pela Agência Internacional de Energia Atômica no ano de 1990.

A escala de acidente nucleares (INES) é utilizada em todo o mundo para relatar a importância do ponto de vista da segurança em um acidente relacionado à energia nuclear, além dos sete níveis, existem um nível zero, onde nenhuma mudança na segurança é proporcionada. A Figura 22 demonstra como é feita a divisão da escala.

Figura 22- Escala Internacional de Acidentes Nucleares.



Fonte: (AIEA, 2021)

- **Nível 7: Acidente mais grave ou superior:**

Liberação extensa de material radioativo com efeitos amplos sobre a saúde da população e do meio ambiente, com exigência de ações remediadoras planejadas pelas autoridades. Os acidentes de Chernobyl, na Ucrânia e de Fukushima I no Japão, como um exemplo de acidente de nível 7: afirma-se que em Chernobyl a radioatividade média das proximidades do local de explosão do reator era 40 vezes maior que a gerada pela bomba de Hiroshima.

- **Nível 6: Acidente grave:**

Liberação em quantidade importante de materiais radioativos para o ambiente externo, passível de exigir aplicação de medidas remediadoras. Os eventos de nível 6 têm consequências humanas e ambientais porque a

quantidade de material radioativo liberado influencia diretamente o meio ambiente.

O acidente nuclear de Mayak na Rússia é o único desastre classificado neste nível. O acidente ocorreu em uma planta de reprocessamento de combustível nuclear como desastre, radioatividade foram liberados.

- **Nível 5: Acidentes com consequências de longo alcance:**

Liberação de quantidade limitada de materiais radioativos com várias mortes ou grande quantidade dentro de uma instalação. Nesses acidentes, há danos ao núcleo do reator, alta probabilidade de exposição à população. Geralmente são causados por incêndios ou acidentes graves. No Brasil, o acidente com o Césio-137, onde 4 pessoas morreram após contaminação em 1987, é classificado como nível 5.

- **Nível 4: Acidente com consequências locais:**

Liberação em pequena quantidade de materiais radioativos ao ambiente com pelo menos 1 morte ou em grande quantidade dentro de uma instalação. Há, também, fusão de combustível nuclear. Em Saint Laurent, na França, a proteção do combustível de um dos reatores foi danificada, representando, assim, um acidente deste nível.

- **Nível 3: Incidente grave:**

Exposição 10 vezes acima do limite anual pré-fixado para trabalhadores com consequências não-letais (queimaduras, por exemplo). E, agravamento de poluição em área não coberta. Em Yanango, no Peru, um soldador ficou diretamente exposto ao colocar uma amostra de irídio no bolso.

- **Nível 2: Incidente:**

Casos onde trabalhadores se expõem além do limite legal anual, população acima de 10 milisieverts, ou radiação acima de 50 milisieverts por hora em área operacional. Alguns acontecimentos desse nível foram noticiados nas usinas de Atucha, na Argentina, e Cadarache, na França.

- **Nível 1: Anomalia:**

Incidentes que não afetam a população ou o meio ambiente, além de quase sempre não comprometerem, ou comprometer em pequena escala, os mecanismos de segurança das instalações nucleares.

4.3.1 *Three Mile Island*

No dia 28 de março de 1979, a usina nuclear instalada no estado americano da Pensilvânia apresenta um incidente somente de consequências materiais, que se caracterizou por isso de derretimento do reator nuclear depois que o elemento combustível se fundira internamente, dada a alta temperatura interna.

Um reator de duas da usina, do tipo PWR com capacidade de geração de 900 MW, entrou em operação comercial em outubro de 1978. O acidente foi causado por falha de equipamento e erro operacional na avaliação das condições de processo. Quando o equipamento falhou, ocasionou perda gradual de água de resfriamento no núcleo do reator, o que resultou na fusão parcial das varetas do elemento combustível com o urânio no seu interior, acarretando liberação de material radioativo.

O acidente, conforme relatos disponíveis, teve início às 4 horas do dia 28 de março, quando bombas de água de alimentação do gerador de vapor do circuito secundário sofreram falha mecânica e elétrica. Neste instante aconteceu o desarme automático da turbina e do gerador de energia, fazendo com que a temperatura e pressão do reator do circuito primário aumentassem.

A situação e os sucessivos erros operacionais no controle da emergência só foram superados depois que a bolha de hidrogênio foi controlada, em 3 de abril. Por precaução houve evacuação da população local dois dias após o ocorrido, a usina voltou a operação e o término de sua descontaminação se deu em 1993, todo rejeito gerado foi colocado em

armazenagem controlada, uma comissão revelaria posteriormente que erros de projeto, manutenção e erros humano foram os agentes causadores deste acidente. (GRIPPI, 2006)

4.3.2. Chernobyl

No dia 25 de abril de 1986 foram iniciados trabalhos de manutenção na unidade 4 da usina nuclear Lênin, em Chernobyl, Pripyat, nordeste da Ucrânia, que se encontrava em operação desde 1984. Era o reator mais novo da usina, pois a unidade um havia entrado em operação em 1978, a unidade dois em 1979 e a unidade 3 em 1982. A central funcionava com quatro reatores de 1000 MW cada. Os reatores de gás-grafite proporcionavam a produção de plutônio após a exaustão do urânio irradiado dentro do reator, razão pela qual várias barreiras de segurança encontradas, por exemplo, em reatores PWR, água pressurizada, não são encontradas em reatores RBMK. (GRIPPI, 2006)

Novamente do dia 25 de abril, a unidade 4 seria desligada para manutenção de rotina. Houve uma pequena mudança no cronograma original de desligamento do reator, pois se desejava realizar uma experiência destinada a testar a refrigeração do reator no caso de perda de corrente alternada. A experiência teve início à 1 hora do dia 25, com a potência do reator gradativamente reduzida. Os sistemas necessários à operação segura da planta foram transferidos para o barramento elétrico do gerador de emergência. Às 14 horas, o sistema de resfriamento de emergência foi deligado para evitar que entrasse em funcionamento durante a experiência, pois, se entrasse, desligaria automaticamente o reator.

No momento da explosão o combustível estava a 1500°C, a tampa de cimento do reator que pesava 2000 t foi violentamente levantada a 14 metros de altura e seus destroços foram espalhados por cerca de 2km, no meio do incêndio ficou o elemento combustível do reator contendo grande quantidade de plutônio e produtos de fissão junto com a grafite radioativo, iniciaram-se vários outros incêndios menores seguidos de explosões. A estrutura de grafite incendiou-se gerando uma reação química do grafite com a estrutura do zircaloy das varetas de urânio, liberando hidrogênio e monóxido de carbono no ambiente e acelerando as explosões. (GRIPPI, 2006)

Os fatos mostram que o acidente de Chernobyl, que alcançou o grau máximo de gravidade de acidente nuclear ocorreu por uma conjugação de três eventos: falha humana, uma usina que utilizava tecnologia ultrapassada (tendo o grafite como moderador), e irresponsabilidade do governo, que demorou um tempo extremamente excessivo para evacuar

a população da região. Nas usinas modernas, esse acidente não seria possível. (MONTAVÃO, 2012)

4.3.3. Fukushima

A usina nuclear de Fukushima era composta por seis reatores, construídos entre 1971 e 1979, pois na época do acidente apenas os reatores 1,2 e 3 estavam operacionais e o reator 4 estava sendo usado para armazenar combustíveis já gasto.

O reator que operava nessa usina era do tipo BWR, foi construída para suportar terremotos de 8,1 na escala Richter, pois estava localizada em uma área com alta probabilidade a terremotos de grandes proporções, foi dimensionada para suportar maremotos de até 5,7 m de altura, mas as ondas chegaram a alcança 14 m.

Após o início do maremoto encobriu e inundou as instalações nucleares e provocou o desligamento do sistema de resfriamento do núcleo, os reatores ativos desligaram, desativou os geradores de emergência que forneciam energia para controlar e operar as bombas que serviam para o resfriamento dos reatores.

Com o resfriamento insuficiente, três reatores entraram em colapso, foram eles o 1, 2 e 3, com liberação de hidrogênio, gás altamente combustível, pela oxidação das varetas, seguida de implosão dos edifícios onde estão os reatores nucleares pela queima do hidrogênio. Houve vazamento de água radioativa para o mar e liberação de gás radioativo para a atmosfera. (MONTALVÃO, 2012)

4.4. Principais Desafios.

Em diversos países a utilização da energia nuclear na composição da matriz energética é uma opção viável em função de seus benefícios associados à minimizar as emissões GEE, a garantia de suprimento energético e a redução de vulnerabilidades associadas ao aumento e a instabilidade dos preços de fontes de energia, porém, a Tecnologia Nuclear tem na opinião pública uma importante restrição à sua utilização, sendo está superada tanto por aqueles que planejam ampliar a utilização da energia nuclear através de novas usinas quanto para países que desejam incluir a energia nuclear em sua respectiva matriz energética. (SANTOS,2015)

No geral pode-se observar que a opinião pública é fortemente influenciada pelo nível de informação e conhecimento da sociedade quanto a tecnologia nuclear, sendo que quanto maior o nível de informação e conhecimento da população sobre a energia nuclear, mais apoio ela dá, na Europa a população considera não possuir ter o nível adequado de conhecimento sobre o assunto e há descrédito nos diversos meios de comunicação existentes. Enquanto cientistas e organizações não governamentais são consideradas fontes confiáveis de informação, apenas 50% da população confiam nas informações de empresas de produção de eletricidade e nas autoridades regulatórias, embora este percentual aumente nos países que utilizam energia nuclear. (SANTOS, 2015)

Como de forma efetiva e desafiadora o papel da energia nuclear deve ser apresentado de forma transparente e informada para promover a conscientização da sociedade brasileira a respeito dos benefícios da energia nuclear e de seus outros usos. É preciso aperfeiçoar a comunicação à sociedade acerca de aspectos relacionados à segurança das usinas e da armazenagem de combustível usado, visto que, mesmo com ocorrências restritas de eventos com usinas nucleares, houve o aumento da percepção de risco, sobretudo, após o acidente de Fukushima. É fundamental esclareces as informações ao público em geral acerca dos padrões de segurança da tecnologia nuclear, protocolos de armazenamento de combustíveis e planos de contingência a fim de que a percepção de risco se torne mais aderente ao registro de eventos da indústria. A fonte nuclear pode ter um papel relevante na redução de emissões de GEE provenientes da geração elétrica no país e no mundo, conforme tem sido apontado por diversos estudos internacionais recentes (MIT, 2018; IEA, 2019;). (PNE2050, 2021)

Arranjos institucionais, legais e regulatórios têm sido estabelecidos no mundo para internalizar as externalidades associadas às mudanças climáticas globais, sendo um dos instrumentos relevantes a criação de mercados de certificados de abatimento de emissões de carbono. Adicionalmente, a característica de uma fonte com alto fator de capacidade a torna

um importante elemento agregador de estabilidade ao sistema elétrico, contribuindo assim para compensar a entrada expressiva na matriz de fontes variáveis como eólica e solar e manter o perfil de baixo carbono da matriz elétrica do Brasil.

Promover adequações institucionais, legais e regulatórias, pois precisam ser superadas para que os empreendimentos termonucleares possam ter oportunidade de participar em um mercado competitivo. É preciso resolver sobre a flexibilização de monopólios da União na cadeia nuclear, visto que compete à União explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados (CF 1988, Art. 21, XXIII), definir modelos de Parceria Público-Privada com arranjos comerciais, e financeiros que tornem os empreendimentos termonucleares atrativos frente às alternativas e com riscos compatíveis com sua economicidade em especial, o tratamento da responsabilidade civil por danos nucleares após a flexibilização do exercício do monopólio da União. (PNE2050, 2021)

Avaliar a expansão da geração nuclear no Brasil tem efeitos positivos à implementação da Política Nuclear Brasileira, em função dos ganhos de economia de escala e escopo. Caso se alcance economia de escala suficiente, a fabricação de combustíveis pode gerar a possibilidade de exportação de combustível nuclear. É um desafio quantificar esses efeitos, já que abrangem outros mercados e segmentos econômicos, como a medicina nuclear, radioisótopos, controle de pragas, irradiação de alimentos, marcadores de erosão, defesa, etc. (PNE2050, 2021)

A Indústrias Nucleares do Brasil (INB), órgão vinculado ao Governo Federal, inaugurou em novembro de 2021 a 9ª cascata de ultracentrífugas da Usina de Enriquecimento Isotópico de Urânio, na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN), em Resende (RJ). Com o início de operação da cascata, será possível produzir 65% da demanda de recargas anuais da usina de Angra 1, um aumento de 5% em relação à capacidade atual. O ministro de Minas e Energia, Bento Albuquerque destacou o desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro para ampliar e diversificar a matriz energética do país, considerada uma das mais limpas do mundo. Segundo ele, um exemplo apresentado a vários países durante a Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP26), em Glasgow, Escócia. O ministro ressaltou a importância dos investimentos para ampliar essa diversificação e enfrentar, por exemplo, situações como a recente falta de chuvas no país. “Superamos a maior crise hidrológica que o país já vivenciou. Supera-se porque tem-se competência, sabemos estabelecer a correta governança e também esta dando continuidade a todos esses programas. Caso não tivesse no

Brasil a energia nuclear, no Brasil não teria nossa hidráulica que foi muito prejudicada pela crise, caso não fosse diversificada a nossa matriz, que hoje é composta basicamente por nove fontes, E, não teríamos superado esse desafio”, completou. (MME, 2021)

O Governo Federal investiu R\$ 54 milhões na construção da 9ª cascata de ultracentrífugas e pretende entregar a 10ª até 2023. A inauguração faz parte da primeira fase de implantação da Usina de Enriquecimento Isotópico de Urânio, um projeto em parceria com a Marinha do Brasil. (MME, 2021)

A metodologia de cálculo é um passo importante, especialmente articulado com outros entes governamentais com atribuições institucionais sobre o tema, conferindo transparência, motivação e justificativa à política pública. (PNE2050, 2021)

Garantir a segurança das instalações nucleares e do ciclo do combustível são uma das principais prioridades da geração nuclear, a Política Nuclear Brasileira relaciona o objetivo de garantir o uso seguro da tecnologia nuclear e fortalecer as atividades relacionadas com o planejamento, a resposta a situações de emergência e eventos relacionados com a segurança nuclear e a proteção física das instalações nucleares. Porém, é essencial manter os mais altos níveis de segurança nas atividades de operação das usinas e de todo o ciclo do combustível nuclear. (PNE2050, 2021)

As operadoras nucleares do mundo estão fazendo investimentos para garantir a operação de suas fábricas para além da vida útil original do projeto, reatores de Geração II têm vida útil estimada em 40 anos, porém muitos estão tendo seu período de operação prolongado por mais 20 anos, as licenças de extensão justificam a P&D e despesas de capital significativas para a substituição de equipamentos desgastados e sistemas de controle desatualizados. Os projetos de extensão de vida útil têm se mostrado competitivo no mundo, no Brasil, a usina de Angra 1 iniciou recentemente esse processo. Estratégias de desativação deverão ser desenvolvidas, em sintonia com o avanço da experiência internacional. No caso de usinas presentes no mesmo sítio, a tendência internacional é manter a usina fechada e iniciar o descomissionamento coletivo de toda a central quando a última unidade atingir o final de sua vida útil. (PNE2050, 2021)

Ampliar o conhecimento sobre os recursos minerais nacionais, pois o Brasil tem um dos maiores recursos de urânio do mundo. Contudo, questões de natureza socioambiental e econômica têm causado a interrupção ou atrasos, como no caso da mina de Cachoeira, em Caetitê, Bahia. Adicionalmente, os recursos brasileiros podem ser ainda maiores, uma vez que grande parte do país ainda não foi prospectada. O dimensionamento desse potencial é

fundamental para o aprimoramento do desenho de estratégia de inserção da fonte no longo prazo, a começar pela bacia uranífera de Lagoa Real na Bahia. (PNE2050, 2021)

4.5. Programa Nuclear Brasileiro.

O Programa Nuclear Brasileiro teve origem em 1975, quando o país assinou um acordo com Alemanha para a construção de oito reatores nucleares para geração de eletricidade, porém, os planos foram reduzidos para a realização de apenas três projetos, todos localizados em Angra dos Reis (RJ).

A primeira usina nuclear, Angra 1, entrou em operação em 1985, e a segunda usina, Angra 2, foi ativada apenas em 2001. As duas usinas são gerenciadas pela Eletrobrás e geram 2 gigawatts (GW) de potência, o equivalente a 2% da capacidade de geração nacional de eletricidade.

A usina Angra 3, começou a ser construída em 1984, sua obra foi paralisada por diversas vezes, e enfrentou denúncias de corrupção e superfaturamento, que provocaram danos de R\$ 400 milhões, segundo o Tribunal de Contas da União (TCU). A construção da usina agora está prevista para terminar em 2026 e deve adicionar 1,4 GW ao sistema elétrico brasileiro.

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050, publicado no ano passado, o Brasil espera ter uma capacidade instalada de energia nuclear entre 8 GW e 10 GW nas próximas três décadas. O volume inclui a energia gerada por Angra 3 e pela nova usina. (PNE2050, 2021)

4.5.1. Usina Termonuclear Angra I

A Angra I deu início a sua operação comercial em 1985, opera com reator do tipo PWR, com 640 MW de potência instalada e tem capacidade suficiente para suprir a demanda de cidades como Porto Alegre e São Luís que possuem cerca de 1 milhão de habitantes, Angra I fica localizada na Praia de Itaorna em Angra dos Reis no Rio de Janeiro, ocupando uma área de 37.918,35m².

Nos primeiros anos de sua operação, Angra 1 enfrentou problemas com alguns equipamentos que prejudicaram o funcionamento da usina. Essas questões foram sanadas em meados da década de 1990, fazendo com que a unidade passasse a operar com padrões de desempenho compatíveis com a prática internacional. Em 2010, a usina bateu seu recorde de

produção, fato que se repetiu novamente em 2011. Esta primeira usina nuclear foi adquirida da empresa americana Westinghouse sob a forma de “turn key”, como um pacote fechado, que não previa transferência de tecnologia por parte dos fornecedores. No entanto, a experiência acumulada pela Eletrobrás Eletronuclear em todos esses anos de operação comercial, com indicadores de eficiência que superam o de muitas usinas similares, permite que a empresa tenha, hoje, a capacidade de realizar um programa contínuo de melhoria tecnológica e incorporar os mais recentes avanços da indústria nuclear. Um exemplo disso foi a troca dos geradores de vapor, dois dos principais equipamentos da usina, realizada em 2009. Com a substituição, a vida útil de Angra 1 poderá ser estendida, permitindo que a usina esteja apta a gerar energia para o Brasil por décadas. (ELETRONUCLEAR, 2015)

O Brasil vivendo uma crise energética que não tem previsão de chegar ao fim, vê-se Angra I ameaçada de encerrar suas operações, pois em 2024 ela estará fazendo 40 anos em atividade, a companhia pediu a prorrogação do prazo por mais 20 anos, o que a permitiria continuar a operação de Angra I até 2044. Caso ela não seja concedida, as atividades serão obrigatoriamente paradas. Assim, a empresa, que planeja também a retomada das obras da usina nuclear de Angra 3 — iniciadas em 1984 e paradas desde 2015, por escândalos de corrupção da Operação Lava Jato —, manteria apenas Angra 2 em funcionamento até 2026. Essa é a data prevista para a conclusão das obras da terceira unidade.

De acordo com a estatal e a CNEN, a prorrogação do licenciamento é feita em etapas. A próxima é a terceira reavaliação periódica de segurança, que ocorrerá em dezembro de 2023 e segue diretrizes da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). “Este será o principal marco do processo de licenciamento para a operação de longo prazo de Angra 1”, cita a Eletronuclear em outro trecho da nota. (ELETRONUCLEAR, 2015)

A CNEN confirmou ter recebido o pedido e destacou ter elaborado duas notas técnicas com os requisitos necessários. “A avaliação está em andamento. Existe documentação complementar que ainda será submetida para avaliação, por exemplo, resposta a exigências geradas em auditorias já realizadas e o relatório da terceira e última reavaliação periódica de segurança, em desenvolvimento, com previsão de ser entregue em 2023”, informou a comissão a respeito do pedido da Eletronuclear.

O Professor do curso de Engenharia Nuclear da UFRJ, um dos poucos do país nessa área, Luiz Pinguelli Rosa, ex-presidente da Eletrobras, destaca que a prorrogação da vida útil de usinas nucleares tem ocorrido no mundo inteiro, mas reforça os cuidados necessários para que isto aconteça. (CNN, 2021)

4.5.2. Usina Termonuclear Angra II.

A Angra II deu início em suas operações comerciais no ano de 2001, fica localizada na Praia de Itaorna em Angra dos Reis no Rio de Janeiro, ocupando uma área de 93.802,74², com potência instalada de 1.350 MW ela é capaz de atender ao consumo de uma cidade de 2 milhões de habitantes, potência consumida por uma cidade como Belo Horizonte.

A usina conta com um reator de água pressurizada (PWR) de tecnologia alemã da Siemens/KWU (hoje Areva NP), fruto de acordo nuclear entre Brasil e Alemanha, assinado em 1975. Angra 2 começou a ser construída em 1981, mas teve o ritmo das obras desacelerado a partir de 1983, devido à crise econômica que assolava o país naquele momento, parando de vez em 1986. A unidade foi retomada no final de 1994 e concluída em 2000. (ELETRONUCLEAR, 2015)

O desempenho da usina tem sido exemplar desde o início, no final de 2000 e no início de 2001, sua entrada em operação permitiu economizar água dos reservatórios das hidrelétricas brasileiras, amenizando as consequências do racionamento de energia, especialmente na região Sudeste, maior centro de consumo do país.

No ano de 2009, a unidade foi a 33^a terceira em produção de energia entre as 436 usinas em operação no mundo, segundo a publicação americana *Nucleonics Week*, especializada em energia nuclear. No mesmo ano, ocupou a 21^a posição em comparação com as 50 melhores usinas americanas numa análise dos indicadores de desempenho da Associação Mundial de Operadores Nucleares (Wano). (ELETRONUCLEAR, 2015)

A construção de Angra 2 propiciou transferência de tecnologia para o Brasil, o que levou o país a um desenvolvimento tecnológico próprio, do qual resultou o domínio sobre praticamente todas as etapas de fabricação do combustível nuclear. Desse modo, a Eletrobrás Eletronuclear e a indústria nuclear nacional reúnem, hoje, profissionais qualificados e sintonizados com o estado da arte do setor. (ELETRONUCLEAR, 2015)

4.5.3. Usina Termonuclear Angra III

A Angra III será a terceira usina localizada na praia de Itaorna, em Angra dos Reis (RJ). Quando entrar em operação comercial, a nova unidade com potência de 1.405 MW de potência instalada, será capaz de gerar mais de 12 milhões de megawatts-hora por ano, energia suficiente para abastecer as cidades de Brasília e Belo Horizonte durante o mesmo

período. Com Angra 3, a energia nuclear passará a gerar o equivalente a 50% do consumo do Estado do Rio de Janeiro. (ELETRONUCLEAR, 2015)

Tanto Angra II quanto Angra III, utilizam tecnologia alemã Siemens/ KWU. As etapas de construção da Unidade incluem as obras civis, a montagem eletromecânica, o comissionamento de equipamentos e sistemas e os testes operacionais. (ELETRONUCLEAR, 2015)

Até o ano de 2015 foram executadas cerca 67,1% das obras civis da Usina. O progresso físico global do empreendimento, considerando todas as outras disciplinas envolvidas, é de 58,4%. Até setembro de 2015 já foram alocados ao empreendimento cerca de R\$ 5,3 bilhões de um total de R\$ 14,8 bilhões (base de junho de 2014), de custos diretos, que serão investidos, sendo que aproximadamente 75% desse valor serão investidos dentro do país.

A construção da usina de Angra 3 está prestes a ser retomada. A Eletronuclear avançou com a licitação para contratar a empresa responsável pelo chamado “Plano de Aceleração do Caminho Crítico”. A terceira usina vai garantir mais estabilidade para o abastecimento de energia de todo o País. Ela substituirá parte da produção de energias mais caras e poluentes, usadas atualmente. (ELETRONUCLEAR, 2022)

Entre as principais medidas que constam no Plano de Aceleração do Caminho Crítico está a conclusão da superestrutura de concreto do edifício do reator de Angra 3. Além disso, será feita uma parte importante da montagem eletromecânica, que inclui o fechamento da esfera de aço da contenção e a instalação da piscina de combustíveis usados, da ponte polar e do guindaste do semipórtico, com o índice atual de conclusão da construção de Angra 3 é de 65%. A Eletronuclear prevê que a usina entre em operação em novembro de 2026. (ELETRONUCLEAR, 2021)

4.6. Análise Econômica.

Neste tópico analisa-se três conceitos que indicam a viabilidade econômica de implantação de projetos, sendo eles: Custos Globais de Geração, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de Retorno de Capital que no caso é o Payback, com essas informações é realizado um comparativo de viabilidade econômica de projetos de construção das três fontes de geração que é a Hidráulica, Térmica e a Nuclear.

4.6.1. Custos Globais de Geração (CGG)

Para um projeto de geração de energia o custo total de geração é estabelecido a partir de suas componentes básicas, pois serve para qualquer tipo de fonte primária: custo de investimento, custo de operação e manutenção e custo de combustível. O primeiro custo básico, representa a parcela de despesas necessárias para aquisição de equipamentos e construção da usina, de forma simples a parcela relativa aos custos de investimento pode ser calculada pela Equação (1):

$$CI = \frac{I}{PI \times FCM \times 8.760} \times FRC \quad (1)$$

I= Investimento considerando os juros durante a construção;

PI= Potência instalada (MW);

FCM= Fator de Capacidade da Usina;

8.760= Número de Horas no Ano;

FRC= Fator de Recuperação do Capital.

O FCM é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a produção total máxima neste mesmo período. Essa razão é representada na fórmula (1) mostrada na forma de valores percentuais.

O CGG cerca de 60% estão vinculados a aquisição de equipamentos de construção de obras civis e os custos de operação e manutenção compreendem os desembolsos realizados para cobertura dos custos com pessoal, material, serviços e outras despesas necessários ao funcionamento dos equipamentos e instalação do sistema de produção. (SANTOS, 2015)

Para os custos com combustível, as usinas hidroelétricas apresentam vantagem competitiva pois estes não apresentam custos, já para as térmicas e as nucleares, estes são regulados pelos preços de mercado e ainda sofrem influência da taxa de câmbio. Entretanto, para reatores nucleares, dos quais são possíveis se obter 45 GWt-dia por tonelada de combustível, e considerando-se o custo de produção de um quilograma de urânio de aproximadamente US\$ 2425,00, o custo total efetivo gasto com combustível nesse caso é de US\$8,75/MWh, já para as térmicas a carvão o custo total efetivo gasto com combustível é em torno de US\$10,94/MWh, já as demais térmicas apresentam este custo em torno US\$11,64/MWh,

4.6.2. Taxa Interna de Retorno (TIR)

O TIR usa o fluxo de caixa de um empreendimento para entender se este é um investimento que trará lucro ou não. Isso é feito por meio da comparação do investimento inicial e suas despesas futuras com o retorno potencial que ele pode trazer, levando em conta os recebimentos futuro do mesmo, a Equação (2) apresenta o cálculo da TIR: (ROSA, 2014)

$$VPL = 0 = I + \sum_{t=1}^n \left[\frac{R_t}{(1+TIR)^t} \right] + \frac{Q}{(1+TIR)^t} \quad (2)$$

Onde:

VPL= Valor Presente Líquido;

I= Investimento de capital no início do projeto;

R_t= Retorno depois de descontados os impostos;

n= Prazo de análise do projeto;

Q= Valor residual do projeto no final do prazo da análise;

T= Tempo. (Anos);

TIR= Taxa Interna de Retorno.

Um projeto é considerado viável se a TIR for maior que a menor taxa de juros aplicada no mercado financeiro para o capital a ser investido.

4.6.3. Payback.

O Payback é um indicador do tempo de retorno de um investimento e um método de tomada de decisões que considera o tempo para obtenção dos valores e o montante que deverá ser retirado dos caixas, utilizado para avaliar a atratividade de um investimento, não devendo ser o único considerado para definição de viabilidade de um projeto. No entanto a análise combinada deste com outros indicadores poderá demonstrar informações valiosas como a relação entre valor e tempo de retorno dos investimentos conforme a Equação (3).

$$PayBack = \frac{\textit{Retorno por período}}{\textit{Investimento Inicial}} \quad (3)$$

4.7. Competitividade Econômica.

As formas de energias mais exploradas no mundo para a produção de energia elétrica são a hidráulica, o carvão mineral, o petróleo, através da utilização do óleo combustível ou do óleo diesel, o gás natural e os combustíveis radioativos. Essas fontes são conhecidas como fontes convencionais de energia, porém, dessas fontes foram selecionadas a hidráulica, térmica e a nuclear para se realizar um comparativo que se possa indicar qual a mais atrativa do ponto de vista do viés econômico.(SANTOS, 2015)

É extremamente importante analisar que, devido as diferenças tecnológicas de cada fonte de geração, as mesmas possuem estruturas de custos diferentes, outro ponto de destaque, são as tecnologias hidráulica e térmica que possuem abertura para receberem investimentos do setor privado. Já a cadeia de produção de energia nuclear é toda controlada pelo estado, sendo um setor estratégico de investimento financeiro governamental e de segurança nacional também.

Relacionamos alguns indicadores que podem encaminhar em direção a investidores quanto às perspectivas de custo de projetos de geração de energia elétrica no Brasil, comparando as três fontes primárias citadas anteriormente. Na Tabela 7 é possível verificar resumidamente que a energia nuclear apresenta baixo custo de combustível e taxa de retorno, entretanto a geração térmica apresenta alta taxa de retorno e um custo de combustível muito alto. (ROSA,2014)

Tabela 7- Custos Por Fonte de Geração.

	Hidro	Térmica	Nuclear
Investimento por kW	Alto	Menor	Muito Alto
Custo Combustível	Nulo	Muito Alto	Baixo
Custo de Op. E Manutenção	Baixo	Alto	Muito Alto
Custo da Energia	Baixo	Alto	Muito Alto
Tempo de Construção	Grande	Menor	Grande
Tempo de Vida	Grande	Pequeno	Médio
Importação	Pequena	Grande	Média
Taxa de Retorno	Baixa	Alta	Baixa

Fonte: (ROSA, 2014)

Segue a Tabela 8 que informa o custo global total efetivo com a produção de energia elétrica de usinas típicas brasileiras, as que possuem maior custo de geração são as térmicas a

carvão, as nucleares e as térmicas movidas a gás natural. Porém se considerado uma ponderação destes custos em função da produção anual de energia, o custo benefício das nucleares se pagam.

Pode-se observar que apesar de apresentarem um custo maior que às movidas a gás natural, elas produzem quase dez vezes mais energia ao comparar as duas fontes de geração. Já se compararmos as nucleares com às térmicas a carvão, novamente a nuclear apresenta uma produção quase dez vezes maior. Além disso, elas apresentam um fator de capacidade de 85%, ou seja, elas conseguem permanecer 85% do tempo produzindo energia em suas capacidades máximas. Tais fatos, demonstram que a solução nuclear pode ser uma excelente saída para ser utilizada na complementaridade sazonal hídrica, visto que as hidrelétricas sem dúvidas são as usinas que apresentam o menor custo e a maior produção no país. (EPE 2050, 2020)

Pelos dados apresentados até aqui, nota-se que pela perspectiva de investimento econômico a energia nuclear, quando comparada às outras fontes primárias, é uma fonte que deve ser considerada pelo governo ao se pensar em expansão do SIN. Pela alta disponibilidade que possui, por produzir energia de forma constante e pela não dependência de condições climáticas para garantia da produção de eletricidade.

Tabela 8- Custo da energia e produção anual das usinas brasileiras

PROJETO(Potência)	Custo da energia	Prazo de Construção
Carvão (350 MW)	R\$ 415 / MWh	~ 5 anos
Nuclear (1345 MW)	R\$ 412 / MWh	~ 6 anos
Gás natural (500 MW)	R\$ 345 / MWh	~ 4 anos
Bagaço de cana (12MW)	R\$ 301 / MWh	~ 4 anos
Hidroelétrica (6450 MW)	R\$ 286 / MWh	~ 6 anos

Fonte: (EPE Caderno de Preços, 2021)

De forma global as análises indicam que a geração de eletricidade através da energia nuclear, do carvão, do gás natural, do bagaço de cana, e onde existem condições locais favoráveis, também a hidroeletricidade e a energia eólica, são competitivas para geração na base do Sistema Elétrico. A competitividade em termos de custos é função de características locais de cada mercado específico, dos custos de financiamento, assim como do custo de emissão de CO₂ e do custo do combustível fóssil, não havendo tecnologia que se destaque em termos de competitividade econômica seja a nível local como a nível global. (SANTOS, 2015)

A nível global, as projeções de custos nivelados indicam a existência de razoável competitividade entre a utilização da energia nuclear e as demais fontes térmicas como o carvão e o gás, sendo a principal vantagem da geração de eletricidade através da energia nuclear a possibilidade de gerar significantes quantidades de energia com baixa emissão de carbono a um custo de produção baixo e estável ao longo do tempo. (SANTOS, 2015)

Em função de dispositivos constitucionais, as usinas nucleares no Brasil são de responsabilidades de empresas estatais e os respectivos empreendimentos submetidos a taxas de retorno compatibilizadas pelo governo e inferiores àquelas praticadas pela iniciativa privada, tendo em vista objetivos mais amplos definidos pelo Estado. Consequentemente, a atratividade econômica da energia nuclear é maior no Brasil do que em países nos quais os empreendimentos dependem de financiamento privado. (SANTOS, 2015)

No próximo capítulo e último, serão apresentadas as conclusões importantes da pesquisa realizada, ressaltando as vantagens comparativas da tecnologia nuclear para a expansão do SIN, destacando alguns dos principais desafios a serem superados pelo setor nuclear no Brasil.

4.8. Considerações Finais.

O objetivo deste capítulo foi fazer uma análise dos principais desafios que a Energia Nuclear tem perante a sociedade e aos seus governantes, informando que esse tipo de fonte geradoras de energia é essencial para a matriz energética brasileira, pois quando seu combustível produzido em larga escala, estará contribuindo para outras áreas não só para o SIN, mas para a medicina nuclear, agricultura com o controle de pragas, irradiação de alimentos, marcadores de erosão, defesa e entre outros setores com da pesquisa.

Foram tecidas a origem do Programa Nuclear Brasileiro, que deu início em 1975 e com isso avançamos na tecnologia com duas usinas nucleares em operação e uma com mais de 60% em obras que possivelmente estará sendo finalizada até em 2026 e entrando em operação, pois já está em fase final de licitação.

Por fim deste capítulo foi feito uma análise econômica, fazendo um comparativo com três fontes de energia primária que é Hidráulica, Térmica e a própria Nuclear, comparando alguns de seus principais aspectos como custo do combustível, custo da energia e entre outros pontos fundamentais.

5 CONCLUSÃO.

Com este trabalho foi possível descrever o quão importante é a energia nuclear para a matriz energética brasileira, mostra-se a evolução que a tecnologia está em evolução a nível mundial e o domínio do ciclo do combustível tanto da mineração até a fase de enriquecimento, pois só três países dominam essa tecnologia no caso é o Brasil, Rússia e EUA, o Brasil é a nação que está entre as maiores jazidas de urânio do mundo.

Com a expansão da capacidade de geração do Sistema Brasileiro e a meta mundial de que cada nação necessita-se diminuir CO₂ nos próximos anos, a energia nuclear voltou a fazer parte da agenda brasileira e mundial, pois são fontes que não emitem GEE, países onde o carvão e queima de combustíveis fósseis dominam a matriz energética, voltaram a procurar a *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, países como a Alemanha que tinham encerrado a operação de alguns reatores, depois da conferência da ONU voltou e fazer estudos pesquisas de opinião pública para reativar e novos projetos para serem elaborados.

O Brasil é um dos países que mais foram na contramão do mundo quanto a emissão de GEE, sendo o quinto em emissor, o fator que mais agravou esse quadro foi o desmatamento da Floresta Amazônica, ficando com sua economia estagnada, foram lançadas metas até o ano de 2030 para baixar, porém, anos atrás foram traçadas metas que não foram alcançadas também.

Quanto a tecnologia dos reatores, está em operação no mundo os de II geração e de III geração que no caso o Brasil com suas duas usinas nuclear em Angra do tipo PWR, há estudos para as novas gerações de reatores mais avançados, que ocupem menos espaços, sejam mais eficientes e mais seguros em relação aos seus resíduos para reprocessamento.

O intuito desse trabalho foi tirar um pouco do preconceito em relação a essa tecnologia que o Brasil domina, pois não só é essencial para geração de energia, mas para o avanço de outras áreas como a medicina nuclear, agricultura, e outros setores que dependem muito até mesmo de combustíveis, o país caso evolua futuramente nessa área nuclear, pode estar exportando urânio em larga escala para outros países que têm interesse no combustível, não para fins bélicos.

O Brasil por ter uma matriz energética mais diversificada do mundo tem que investir em fontes renováveis como a Energia Solar e Eólica, fica-se menos dependente da queima de carvão e hídrica, pois em tempos de escassez hídrica as térmicas são ligadas e gerando mais GEE.

5.1. Contribuições do trabalho.

Este trabalho contribuiu para uma análise de um estudo teórico da energia nuclear geradora de energia ativa na Matriz Energética Brasileira que não emite CO₂ e alguns dos principais pontos causadores para aumento na geração do GEE, além disso foi esplanada todo o processo que o urânio é minerado e enriquecido no Brasil.

5.2. Trabalhos futuros.

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho, puderam ser identificadas algumas possibilidades de melhorias e de continuação a partir de futuras pesquisas, recomenda-se que aprofundem mais nas pesquisas da nova geração de reatores nucleares, que são os da IV Geração.

REFERÊNCIAS

- ABIDES - Associação Brasileira de Integração e Desenvolvimento. **O destino dos rejeitos radioativos**. 2010. Disponível em: <<http://abides.org.br/nucleo/?p=16>>. Acesso em: 21 dez. 2021
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. v. Box 8 PIII, p. 117–128, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap8.pdf> Acesso em 10 out. de 2019.
- BRASIL. Lei Nº 4.118, de 27 de agosto de 1962. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. **Diário oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 1962, art. 1, p. 3201.
- BROWN, LEMAY & BURSTEN, QUÍMICA A CIÊNCIA CENTRAL - 9.ed. Pearson Prentice Hall ed. 2016.
- CARDOSO, E M; ALVES, I P; BRAZ, C; PESTANA, S. **Apostila Educativa – A Energia Nuclear**, CNEN, 2012 Disponível em <http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia_aplic.pdf> Acesso em 16 nov. de 2019.
- Caderno institucional Eletronuclear**; Disponível em <<http://www.eletronuclear.gov.br/Quem-Somos/Paginas/A-Eletronuclear.aspx>> Acesso em 01 de nov. de 2019
- CARVALHO, Joaquim Francisco. **O espaço da energia nuclear no Brasil**. Estudos avançados, v. 26, n. 74, p. 293-308, 2012.
- DAU, Claudio Gilberto Monteiro. **ENERGIA NUCLEAR: SEGURANÇA E REJEITOS RADIOATIVOS**. 54 f. MONOGRAFIA (Especialista em Direito Ambiental) - Universidade Candido Mendes, 2009.
- Eletronuclear, **Caderno Institucional**, Disponível em <<http://online.pubhtml5.com/fqry/mbds/#p=1>> Acesso em 10 out. de 2019
- Eletronuclear, **Energia nuclear no mundo**; Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-nuclear-no-mundo.aspx>> Acesso em 15 fev. 2021.
- EPE, **Caderno de Preços da Geração 2021**; Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-622/CadernodePreçosdeGeração_r0.pdf> Acesso em 16 jun. 2022.
- EPE, **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**; Disponível em <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%200007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20Elétrica.pdf>> Acesso em 20 de nov. de 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas**: Ganhos de eficiência, energia e capacidade instalada, Outubro de 2019; Disponível em <<http://www.epe.gov.br>> Acesso em 20 nov. de 2021)

Exame de Tecnologia Nuclear 2019, Nuclear Technology Review 2019; Disponível em <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2_sp.pdf> Acesso em 29 de out. de 2019.

FLORES, T. S. **Um Breve Estudo Comparativo Entre as Energias Eólica e Nuclear**. p. 8307, 2014. Disponível em: <<http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/18494/pdf>>. Acesso em 11 out. de 2019.

Relatório de 2019 IAEA Setembro; Disponível em <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2_sp.pdf> Acesso em 10 out. de 2019.

IEA, **World Energy Outlook 2021**. Disponível em <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>> Acesso em 21 de dez. de 2021.

IAEA, **BRAZIL: A Country Profile on Sustainable Energy Development**. IAEA, Vienna, 2006.

IAEA. **International Atomic Energy Agency. PRIS - Power Reactor Information System**. Disponível em: <<http://www.iaea.org/PRIS/>> Acesso em 14 de jun. de 2022.

IEMA, **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970-2020)**; Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020>> Acesso em 20 de jan. de 2022.

INB; Disponível em <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ur%C3%A2nio/Recursos>> Acesso em 10 de out. de 2021.

INB; Disponível em <<https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>> Ciclo do combustível; Acesso em 11 de jan. de 2022.

Ministérios de Minas e Energia; Disponível em <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-tem-5-maior-reserva-de-uranio> Acesso em 10 de out. de 2019.

Ministério de Minas e Energia; Disponível em <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/11/brasil-aumenta-capacidade-de-enriquecimento-de-uranio>> Acesso em 01 de jan. de 2022.

MONTALVÃO, Edmundo (Ed.). **ENERGIA NUCLEAR: RISCO OU OPORTUNIDADE?**. 108. ed. Brasília: Senado Federal, 2012. 19 p. Disponível em:

<<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-paradiscussao/td-108-energia-nuclear-risco-ou-oportunidade>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

MRS ESTUDOS AMBIENTAIS LTDA (Ed.). **Relatório de Impacto Ambiental da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto**. Porto Alegre: Mrs Estudos Ambientais Ltda, 2004. Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/manut/ImprimeCrono.asp?Ano=2006&seq=1&unidade=CNEN>> Acesso em: 10 nov. 2020.

PDE 2030; Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf> Acesso em 10 de jun. de 2022.

PNE 2050; Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>> Acesso em 10 de jun. de 2022.

ROSA, L. P. **Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 39–58, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf//ea/v21n59/a04v2159.pdf>> Acesso em: 20 de jan. de 2022.

SANTOS, Ricardo Luís Pereira dos. **A ENERGIA NUCLEAR NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**. 2014. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/luis_pereira.pdf>. Acesso em: 11 out. 2019.

Silva, O. L. P. D., Marques, A. L. F., & SA, E. E. T. (2006). **Uranium enrichment in Brazil. Development of the ultracentrifugation technology**; Enriquecimento de urânio no Brasil. Desenvolvimento da tecnologia por ultracentrifugação.

Urânio, Mathias Heider, Centro Tecnológico de Minas Gerais; Disponível em http://ecologia.icb.ufmg.br/~rpcoelho/Congressos/CETEC_agosto2011/perfil_uranio.pdf, Acesso em 10 de nov. de 2019.

Villalva, M. G. (2015). Energia Solar Fotovoltaica. Saraiva Educação SA.

Matriz Energética Brasileira; Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em 15 fev. 2021