

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**JONATHAN BAPTISTA MEIRELLES**

**O POTENCIAL BRASILEIRO NA GERAÇÃO TERMONUCLEAR**

**VOLTA REDONDA  
2020**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**O potencial brasileiro na geração termonuclear.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Discente:

Jonathan Baptista Meirelles

Orientador:

Prof.M.Sc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

**VOLTA REDONDA  
2020**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Jonathan Baptista Meirelles

O potencial brasileiro na geração termonuclear

Orientador:

Prof. M.Sc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

Banca examinadora:

---

Prof. M.Sc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

---

Prof. Esp. Bruno Moreira da Silva

---

Prof. M.Sc. Edson de Paula Carvalho

“Demore o tempo que for para decidir o que  
você quer da vida, e depois que decidir não  
recue ante nenhum pretexto, porque o  
mundo tentará te dissuadir.”

Friedrich Nietzsche

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família e amigos por compreender e me apoiar nos momentos de dedicação da elaboração deste trabalho.

Ao Prof. M.Sc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva por acreditar e aceitar a proposta deste trabalho.

Aos colegas e amigos da INB pelo suporte prestado para mim na elaboração do trabalho.

## RESUMO

O Brasil com sua matriz hidrotérmica destaca-se por ser um grande gerador de eletricidade bruta com um baixo impacto ambiental, entretanto a contínua queda na regulação dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas tem levado ao crescimento da participação das termelétricas na geração de energia elétrica base, fato que vai na contramão do esforço mundial de reduzir as emissões dos gases de efeito estufa.

Diante do exposto, a energia nuclear se apresenta como alternativa para geração base, todavia, a tecnologia nuclear é um assunto controverso, principalmente quando está associada a assuntos como aceitação pública, armazenamento de resíduos e viabilidade econômica.

Esta pesquisa objetiva apresentar o potencial da geração termonuclear no Brasil e analisá-la como opção futura para a geração de energia base.

**Palavras-chave:** Energia Nuclear, Hidrelétricas, Geração Base, Geração Termonuclear

## **ABSTRACT**

Brazil, with its hydrothermal matrix, stands out for being a large generator of gross electricity with a low environmental impact, however the continuing decline in regulating the levels of the reservoirs of the hydroelectric plants has led to the growth of the participation of the thermoelectric plants create basic electric power, contrary to the worldwide effort to reduce emissions of greenhouse gases.

Nuclear energy presents itself as an alternative to base generation, however, nuclear technology is a controversial issue, when it is associated with issues such as public acceptance, waste storage and economic viability.

This research aims to present the potential of thermonuclear generation in Brazil and analyze it as a future option for base energy generation.

**Keywords:** Nuclear Energy, Hydroelectric Plants, Base Generation, Thermonuclear Generation

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. Problema abordado e justificativa .....	14
1.2. Objetivos .....	14
1.2.1. Objetivo Geral .....	14
1.2.2. Objetivos Específicos .....	15
1.3. Metodologia .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1. Matriz Energética .....	16
2.2. Matriz Elétrica .....	17
2.3. Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) .....	17
2.3.1. Organograma do Setor Elétrico .....	18
2.3.1.1. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) .....	18
2.3.1.2. Ministério de Minas e Energia (MME) .....	19
2.3.1.3. Conselho de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) .....	19
2.3.1.4. Empresa de Pesquisa Energética (EPE) .....	20
2.3.1.5. Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) .....	20
2.3.1.6. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) .....	21
2.3.1.7. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) .....	21
2.4. Sistema Interligado Nacional (SIN) .....	22
2.4.1. Regulação de reservatórios .....	22

2.4.2. A função das termoelétricas no SIN.....	24
2.4.3. Diferenciação das fontes termoelétricas .....	25
2.5. Ciclo do combustível nuclear .....	26
2.5.1. Indústrias Nucleares do Brasil (INB) .....	27
2.5.2. Mineração e Beneficamento .....	28
2.5.3. Conversão .....	29
2.5.4. Enriquecimento Isotópico.....	29
2.5.5. Reconversão.....	30
2.5.6. Fabricação de Pastilhas de UO <sub>2</sub> .....	30
2.5.7. Montagem do Elemento Combustível .....	32
2.5.8. Geração Elétrica .....	33
2.5.9. Tecnologia nuclear.....	34
2.5.10. Tipos de reatores .....	36
2.5.10.1. Pressurised Water Reactor (PWR) .....	36
2.5.10.2. Boiling Water Reactor (BWR) .....	37
2.5.10.3. Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR) .....	38
2.5.10.4. Light Water Graphite Reactor (LWGR) .....	39
2.5.10.5. Gas-Cooled Reactor (GCR) .....	40
2.5.10.6. Fast Breeder Reactor (FBR) .....	41
2.5.11. Reprocessamento.....	42
2.5.12. Armazenamento.....	43

2.5.13. Disposição Final.....	43
2.6. Rejeitos Nucleares.....	43
2.7. Salvaguarda Nuclear .....	45
<b>3. ANÁLISE .....</b>	<b>47</b>
3.1. Segurança energética.....	47
3.2. Impacto dos Gases de Efeito Estufa.....	51
3.3. Geração termonuclear no Brasil e no Mundo .....	54
3.4. Controle e supervisão da proliferação do uso militar da energia nuclear .....	58
3.5. Potencial energético do urânio brasileiro .....	60
3.6. Viabilidade econômica .....	63
3.7. Opinião e aceitação pública.....	66
3.8. Gerenciamento e Armazenamento de resíduos .....	67
<b>4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráficos da Matriz Energética Brasileira .....	16
Figura 2 - Gráficos da Matriz Elétrica Brasileira .....	17
Figura 3 - Organograma do setor elétrico .....	18
Figura 4 - Fluxograma de decisão de despacho de termelétricas.....	24
Figura 5 - Fluxograma do Ciclo aberto do combustível nuclear.....	27
Figura 6 - Fluxograma do Ciclo aberto do combustível nuclear .....	27
Figura 7 - Mina de Urânio em Caetité, Bahia .....	28
Figura 8 - Cascata de enriquecimento isotópico .....	30
Figura 9 - Fluxograma do processo de fabricação de pastilhas de UO <sub>2</sub> .....	32
Figura 10 - Elemento combustível .....	33
Figura 11 - Gerações tecnológicas dos reatores nucleares .....	35
Figura 12 - Tipos de reatores em operação no mundo.....	36
Figura 13 - Reator a Água Pressurizada .....	37
Figura 14 - Reator a Água Fervente .....	38
Figura 15 - Reator a Água Pesada .....	39
Figura 16 - Reator Refrigerado a Água Leve e Moderado a Grafite .....	40
Figura 17 - Reator Básico Refrigerado a Gás .....	41
Figura 18 - Reator Avançado Refrigerado a Gás .....	41
Figura 19 - Reator Regenerador Rápido .....	42
Figura 20 - Demanda per capita 2018, MWh/hab.....	47
Figura 21 - Relação entre a energia armazenada nos reservatórios com a participação hidráulica e térmica na matriz elétrica.....	49
Figura 22 - Curva do CVU por fonte térmica.....	50
Figura 23 - Emissões de GEE do Setor Elétrico.....	52
Figura 24 - Quantidade de CO <sub>2eq</sub> / KWh de cada fonte primária.....	53
Figura 25 - Participação da geração nucleoeletrica nas matrizes dos países detetores da tecnologia nuclear.....	54
Figura 26 - Número de Reatores em Operação x Carga Instalada.....	56
Figura 27 - Reservas de urânio descoberta em território nacional.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre as fontes térmicas. ....	26
Tabela 2 - Relação material/quantidade de desconfiança de uso não pacífico.....	46
Tabela 3 - Fator de Capacidade médio das fontes primárias do SIN. ....	50
Tabela 4 - Densidade energética de fontes combustíveis .....	62
Tabela 5 - Divisão de custos de um empreendimento nuclear .....	63
Tabela 6 - Custo de investimento para construção de usinas elétricas .....	65

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ABACC – Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares  
AGR – Advanced Gas-Cooled Reactor  
ADS – Diestearato de Alumínio  
BWR – Boiling Water Reactor  
BEN - Balanço Energético Nacional  
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear  
CTMSP – Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo  
CNPE – Conselho Nacional de Política Energética  
CMSE – Comitê de Monitoramento do Setor Energético  
CCEE – Câmara de comercialização de Energia Elétrica  
CVU – Custo Variável Unitário  
DUA – Diuranato de Amônio  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
EUA – Estados Unidos da América  
EAR – Energia Armazenada  
FBR – Fast Breeder Reactor  
FCN – Fabrica de Combustível Nuclear  
FC – Fator de Capacidade  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
GCR – Gas-Cooled Reactor  
HLW – High Level Waste  
IAEA – International Atomic Energy Agency  
IEA – International Energy Agency  
INB – Indústrias Nucleares do Brasil  
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
ILW – Intermediate Level Waste  
LWGR – Light Water Graphite Reactor  
LLW – Low Level Waste  
MOX – Mixed-Oxide Fuel

MME – Ministério de Minas e Energia  
MMA – Ministério de Meio Ambiente  
MPF – Ministério Público Federal  
NEA – Nuclear Energy Agency  
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico  
OIE – Oferta Interna de Energia  
OIEE – Oferta Interna de Energia Elétrica  
OCDE – Organização para a cooperação e desenvolvimento econômico  
ONU – Organizações das Nações Unidas  
PWR – Pressurised Water Reactor  
PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia  
PNE – Plano Nacional de Energia  
PCC – Período de Controle de Cheias  
PFCC – Período Fora do Controle de Cheias  
SIN – Sistema Interligado Nacional  
SEB – Sistema Elétrica Brasileiro  
SIPOT – Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico  
SCCC – Sistema Comum de Contabilidade de Materiais Nucleares  
TCAU – Tricarbonato de Amônio e Uranila  
TNP – Tratado de Não Proliferação  
UFLA – Universidade Federal de Lavras  
UAS – Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustível Irradiado

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a crise do petróleo em 1970, a energia nuclear foi uma solução para muito dos países que dependiam grande parte da sua geração por recursos fósseis, porém alguns acidentes famosos com usinas nucleares, como o Three Mile Island (1979) nos EUA e Chernobyl (1986) na antiga União Soviética, assim como a ausência da disposição definitiva dos rejeitos nucleares fez com que a ascensão deste tipo de geração diminuísse gradativamente. Entretanto, com o aumento da demanda energética e a preocupação com agravamento do efeito estufa, cria-se um novo cenário mundial de geração de energia.

No Brasil, durante muito tempo a demanda de energia elétrica foi quase que exclusivamente suprida por usinas hidrelétricas. Mesmo durante períodos hidrológicos adversos, o suprimento foi possível devido a significativa capacidade de regularização dos reservatórios, sendo possível armazenar a água do período chuvoso e utilizá-la no período seco. Porém, por diversos fatores conjunturais, houve a necessidade de se expandir e adicionar novas fontes de geração ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Por isso, outras fontes despacháveis<sup>1</sup>, como as térmicas, integraram-se ao SIN compondo, assim, o parque gerador nacional de energia base. Além disso, o parque gerador brasileiro conta com usinas térmicas para complementaridade sazonal, o que equilibra o sistema entre o baixo custo e a alta incerteza da geração hidrelétrica e o alto custo e a baixa incerteza da geração termoelétrica. Entretanto, há uma restrição ambiental na criação de novas hidrelétricas com grandes reservatórios de acumulação, o que dificulta a regularização dos reservatórios, aumentando assim a participação das térmicas. De acordo com o Balanço Energético Nacional 2020 (BEN, 2020), em 2012, a geração térmica representava 22,11% da composição da matriz elétrica brasileira, porém em 2019 sua participação cresceu e chegou ao patamar de 25,5%. Em contrapartida, a geração hidráulica que em 2012 representava cerca de 75,18%, em 2019 reduziu e ficou em aproximadamente 64,9%.

---

<sup>1</sup> Fontes despacháveis: cujo o montante de energia pode ser entregue no tempo determinado por um controlador humano.

Em função da progressiva redução da contribuição da geração hidráulica na composição da matriz elétrica brasileira que ocorrerá ao longo do século XXI, as ações de planejamento da expansão do Sistema Elétrico Brasileiro devem se adaptar às mudanças da matriz elétrica do país. Já é possível verificar uma maior participação da geração térmica na matriz brasileira e isso será essencial, no longo prazo, para garantir uma operação segura e confiável do Sistema Interligado Nacional. (SANTOS, 2014; VEIGA, 2011)

Portanto, a geração termoelétrica, assim como outras formas de geração, aumentou sua parcela de importância na geração base do Brasil. Considerando o esforço da redução de gases de efeito estufa, faz-se necessário repensar o papel da energia nuclear neste processo de reformulação.

### **1.1. Problema abordado e justificativa**

Com a incerteza futura da geração hidráulica e a busca por alternativas não emissoras de gases de efeito estufa, a geração termonuclear se torna uma das candidatas promissoras como fonte alternativa. Desta forma, questiona-se a viabilidade da expansão nuclear e sua eficácia como alternativa.

Pensando sobre este fato, o presente trabalho se propõe a realizar uma análise do potencial que a geração termonuclear possui e se justifica através da comparação com as demais fontes de geração térmica, mostrando suas potencialidades. Em contribuição para o seu público alvo, há o benefício da aplicação das informações para o debate sobre a utilização da geração termonuclear.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar a geração termonuclear como uma alternativa de suprimento à geração de energia elétrica de base para a matriz elétrica em resposta às demandas futuras.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o cenário energético atual e futuro no Brasil;
- Apresentar o papel da geração termonuclear no sistema elétrico brasileiro;
- Descrever as vantagens e desvantagens da geração termonuclear em relação as outras termoelétricas;
- Mensurar a quantidade de energia elétrica que as jazidas de urânio já descobertas no Brasil são capazes de gerar;
- Apresentar a geração nuclear como uma das alternativas para garantir a segurança energética nacional;
- Compreender os desafios para uma futura expansão.

### 1.3. Metodologia

A estratégia de pesquisa utilizada para a realização desse estudo pode ser classificada quanto a sua natureza como Pesquisa Básica. Segundo Freitas (2013), a pesquisa básica tem como objetivo gerar novos conhecimentos úteis para a produção científica sem a necessidade de uma aplicação prática e engloba verdades e interesses universais.

Trata-se de um estudo com abordagem quali-quantitativa em relação à problemática. Esta abordagem mista visa à utilização de métodos tanto qualitativos quanto quantitativos para a análise do objeto de estudo. Quanto ao ponto de vista dos objetivos, este estudo apresenta caráter exploratório, procurando proporcionar maior familiaridade com o problema tornando-o explícito, assim como caráter descritivo, visando descrever relações entre variáveis. (FREITAS, 2013)

O procedimento técnico adotado neste estudo será a pesquisa bibliográfica, cujo a obtenção dos dados se dê a partir de material já publicado, constituído principalmente de: livros, publicações em periódicos, teses, monografias, jornais especializados, artigos científicos, dissertações e boletins. Também contará com uma pesquisa documental, onde os dados apresentados ainda não receberam um

tratamento analítico ou podem ter sido reelaborados de acordo com o objetivo da pesquisa em questão. (FREITAS, 2013)

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Matriz Energética

A matriz energética é um conjunto de fontes de energia ofertado no país para captar, distribuir e utilizar energia nos setores comerciais, industriais e residenciais. Esta matriz representa a Oferta Interna de Energia (OIE) disponível em um país, e é contabilizada em toneladas equivalentes de petróleo (tep) e a origem dessa energia pode ser de fontes renováveis ou não renováveis.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), em 2019, a OIE brasileira foi de 294 milhões de tep, onde 46,1% advém de fontes renováveis de geração de energia. Em comparação com a matriz energética mundial, onde apenas 14,2% da participação é de fontes renováveis, o Brasil mostra-se bem mais adiantado com as questões ambientais no setor de produção energia elétrica, reforçando uma vantagem da matriz brasileira em relação ao restante do mundo. A Figura 1 apresenta a matriz elétrica brasileira, assim como as principais fontes que a compõem.

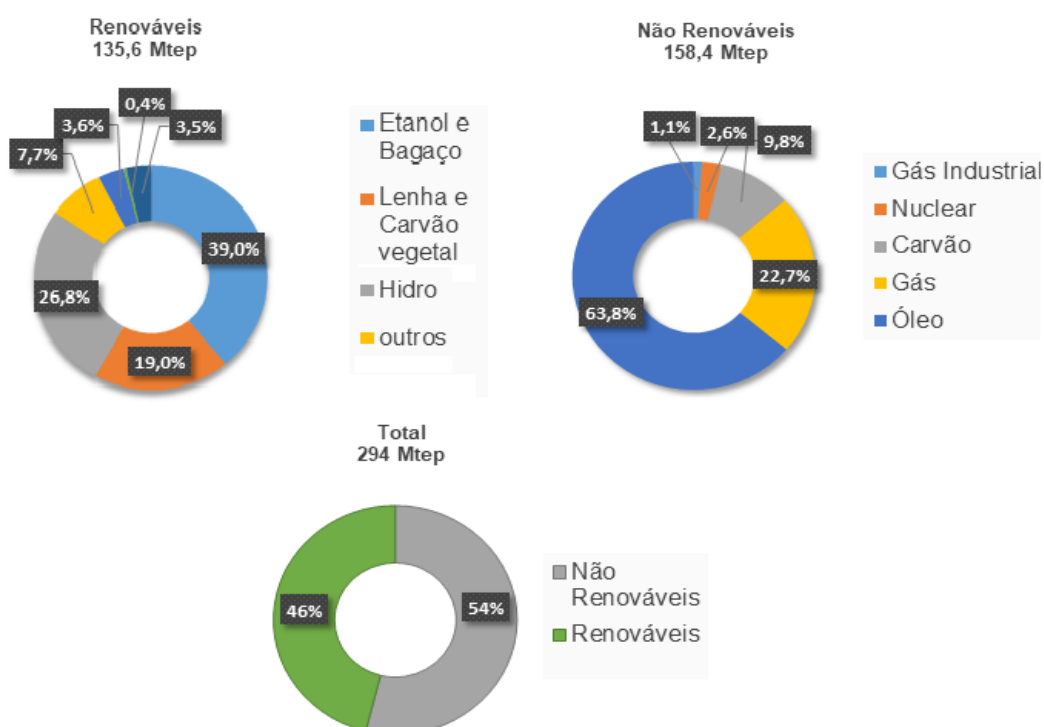


Figura 1 - Gráficos da Matriz Energética Brasileira (Fonte: Ministério de Minas e Energia)

## 2.2. Matriz Elétrica

A matriz elétrica, que faz parte da matriz energética, é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. Segundo o MME, em 2019 a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) ficou em 651,3 TWh, com a predominância de fontes renováveis, a matriz elétrica brasileira se diferencia da média mundial, onde apenas 26,7% de sua matriz é por fontes renováveis.

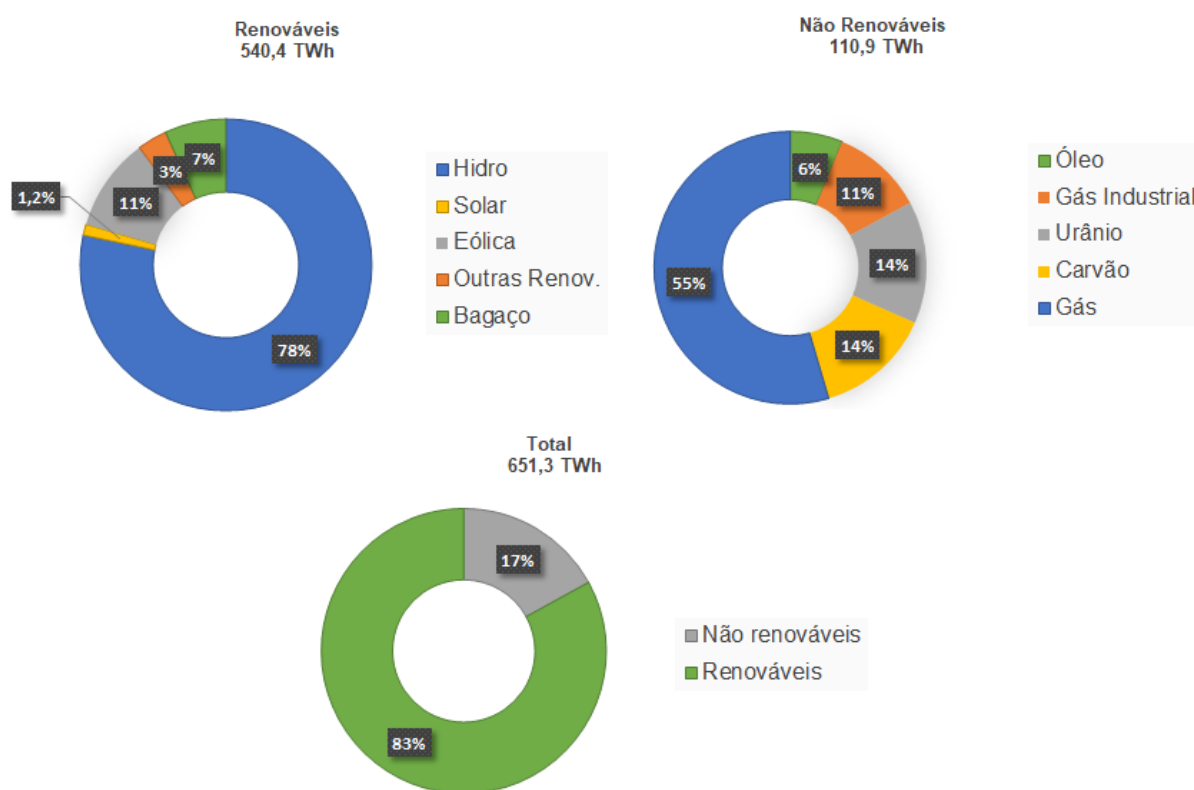


Figura 2 - Gráficos da Matriz Elétrica Brasileira (Fonte: Ministério de Minas e Energia)

## 2.3. Sistema Elétrico Brasileiro (SEB)

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) tem características que o distinguem dos sistemas de outros países: recursos hídricos abundantes distribuídos por bacias com regimes hidrológicos distintos.

Representado principalmente por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento

do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel um estratégico relevante, pois contribuem tanto para a geração de base quanto para suprimento do aumento da demanda.

### 2.3.1. Organograma do Setor Elétrico

Implantado em 2004, o atual modelo do setor elétrico brasileiro criou novas instituições e alterou funções de outras já existentes focando em um planejamento de contratação de energia através de contratos de longo prazo, o que gera previsibilidade na geração de caixa e favorece a obtenção de linhas de financiamento para sustentar o projeto nos primeiros anos, principalmente na fase de construção. O modelo do setor é formado por sete instituições conforme a figura 3.

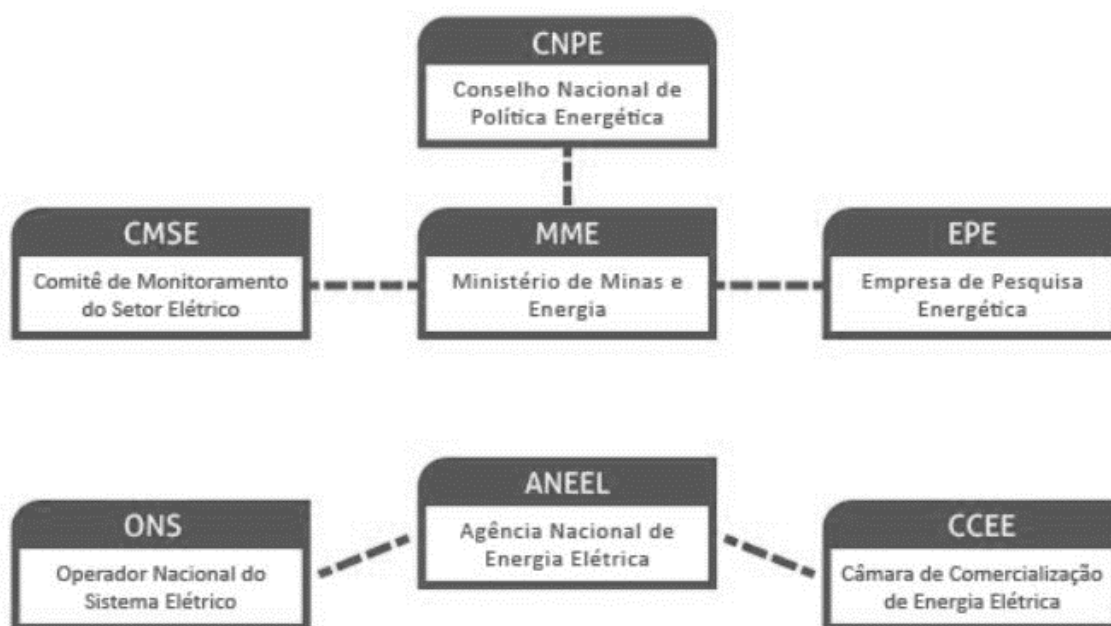


Figura 3 - Organograma do setor elétrico (Fonte: CCEE, 2020)

#### 2.3.1.1. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)

O CNPE é um órgão interministerial de assessoramento à Presidência da República que tem como principais atribuições a formulação de políticas e diretrizes

de energia que assegurem o suprimento de insumos energéticos a todas as áreas do país, incluindo as mais remotas e de difícil acesso.

O CNPE é também responsável por revisar periodicamente as matrizes energéticas aplicadas às diversas regiões do país, por estabelecer diretrizes para programas específicos – como os de uso do gás natural, do álcool, de outras biomassas, do carvão e da energia termonuclear e por estabelecer diretrizes para a importação e a exportação de petróleo e gás natural.

O Decreto nº 6.685/2008 estabelece que, em função da pauta e a critério do presidente do CNPE, o presidente do Conselho de Administração da CCEE pode ser convidado a participar das reuniões do CNPE. (CCEE, 2020)

### **2.3.1.2. Ministério de Minas e Energia (MME)**

O MME é o órgão do governo federal responsável pela condução das políticas energéticas do país. Suas principais obrigações incluem a formulação e a implementação de políticas para o setor energético, de acordo com as diretrizes definidas pelo Conselho Nacional de Política Energética - CNPE.

O MME é também responsável por estabelecer o planejamento do setor energético nacional, por monitorar a segurança do suprimento do setor elétrico brasileiro e por definir ações preventivas para restauração da segurança de suprimento no caso de desequilíbrios conjunturais entre oferta e demanda de energia.(CCEE, 2020)

### **2.3.1.3. Conselho de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)**

CMSE é um órgão sob coordenação direta do Ministério de Minas e Energia, criado com a função de acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional.

Suas principais atribuições incluem: acompanhamento do desenvolvimento das atividades de geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação e exportação de energia elétrica; avaliação das condições de abastecimento e de atendimento; realização periódica de análise integrada de segurança de abastecimento e de atendimento, identificação de dificuldades e obstáculos que

afetem a regularidade e a segurança de abastecimento e expansão do setor, elaboração de propostas para ajustes e ações preventivas que possam restaurar a segurança no abastecimento e no atendimento elétrico.

A Câmara de Comercialização passou a compor o CMSE em 2004, conforme estabelecido no decreto nº 5.175. (CCEE, 2020)

#### **2.3.1.4. Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**

A EPE é uma instituição vinculada ao Ministério de Minas e Energia cuja finalidade é a prestação de serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético.

Entre suas principais atribuições estão a realização de estudos e projeções da matriz energética brasileira; a execução de estudos que propiciem o planejamento integrado de recursos energéticos; o desenvolvimento de estudos que propiciem o planejamento de expansão da geração e da transmissão de energia elétrica de curto, médio e longo prazos; a realização de análises de viabilidade técnico-econômica e socioambiental de usinas; e a obtenção da licença ambiental prévia para aproveitamentos hidrelétricos e de transmissão de energia elétrica.

A EPE foi instituída pela Lei nº 10.847/2004, e teve sua criação regulamentada pelo Decreto nº 5.184/2004. Em dezembro de 2010, a EPE firmou com a CCEE um acordo de cooperação técnico-operacional, com o objetivo de formalizar, em nível institucional, procedimentos para o fluxo de informações sobre os leilões e os contratos de compra e venda de energia e de dados de mercado. (CCEE, 2020)

#### **2.3.1.5. Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)**

A Aneel tem as atribuições de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Zelar pela qualidade dos serviços prestados, pela universalização do atendimento e pelo estabelecimento das tarifas para os consumidores finais, sempre preservando a viabilidade econômica e financeira dos agentes e da indústria, também é responsabilidade da Aneel.

As alterações promovidas em 2004 pelo atual modelo do setor estabeleceram como responsabilidade da Aneel, direta ou indiretamente, a promoção de licitações

na modalidade de leilão para a contratação de energia elétrica pelos agentes de distribuição do Sistema Interligado Nacional - SIN. Desde então, a Aneel tem delegado a operacionalização desses leilões à CCEE.

A Aneel foi instituída pela Lei nº 9.427/96 e teve sua constituição normatizada pelo Decreto nº 2.335/97. (CCEE, 2020)

#### **2.3.1.6. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)**

O ONS é a instituição responsável por operar, supervisionar e controlar a geração de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional e por administrar a rede básica de transmissão de energia elétrica no Brasil.

O ONS tem como objetivos principais o atendimento dos requisitos de carga, a otimização de custos e a garantia de confiabilidade do sistema. Outra responsabilidade da instituição é a definição das condições de acesso à malha de transmissão em alta-tensão do país.

Foi criado pela Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, e regulamentado pelo Decreto nº 2.655, de 2 de julho de 1998, com as alterações do Decreto nº 5.081, de 14 de maio de 2004. Em 2010, CCEE e ONS firmaram um acordo operacional estabelecendo diretrizes para o intercâmbio de informações e dados necessários ao desenvolvimento adequado de suas atividades, tendo em vista o aumento da eficiência do setor elétrico brasileiro. (CCEE, 2020)

#### **2.3.1.7. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)**

A Câmara de Comercialização atua como operadora do mercado brasileiro de energia elétrica, voltada à viabilização de um ambiente de negociação competitivo, sustentável e seguro. A CCEE promove discussões e propõe soluções para o desenvolvimento do setor elétrico nacional, fazendo a interlocução entre os agentes e as instâncias de formulação de políticas e regulação. O foco de atuação da instituição é a evolução do segmento de comercialização, pautado pela neutralidade, liquidez e simetria de informações.

No âmbito operacional, uma das principais atividades da CCEE é contabilizar as operações de compra e venda de energia elétrica, apurando mensalmente as

diferenças entre os montantes contratados e os montantes efetivamente gerados ou consumidos pelos agentes de mercado. Para tanto, registra os contratos firmados entre compradores e vendedores, além de medir os montantes físicos de energia movimentados pelos agentes.

A CCEE também determina os débitos e créditos desses agentes com base nas diferenças apuradas, realizando a liquidação financeira das operações. Para valorar tais diferenças, a instituição calcula o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).

Criada pela Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004 e regulamentada pelo decreto Nº 5.177 de 12 de agosto de 2004. (CCEE, 2020)

## **2.4. Sistema Interligado Nacional (SIN)**

O Sistema Interligado Nacional é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte.

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permitindo assim a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

Além disso, há diversos sistemas de menor porte, não-conectados ao SIN que são chamados de Sistemas Isolados, se concentram principalmente na região Amazônica, no Norte do país. Isto ocorre porque as características geográficas da região, dificultaram a construção de linhas de transmissão de grande extensão que permitissem a conexão ao SIN. (ONS, 2020a)

### **2.4.1. Regulação de reservatórios**

A regulação de reservatórios é uma atividade de tempo real executada tanto no período de controle de cheias (PCC<sup>2</sup>) quanto no período fora do controle de cheias

---

<sup>2</sup> O PCC corresponde ao período em que, em geral, há alocação de volume de espera nos sistemas de reservatórios. Esse período é identificado, para cada sistema de reservatórios, com base

(PFCC). Consiste na operacionalização das diretrizes hidráulicas que, utilizando a capacidade de regulação dos reservatórios, permite o gerenciamento do armazenamento de água nos reservatórios, considerando a otimização energética, o controle de cheias e o uso múltiplo das águas.

A ONS e os agentes de geração realizam a operação hidráulica dos sistemas de reservatórios utilizando as informações dos níveis de montante e de jusante, das vazões afluentes e defluentes, da disponibilidade de armazenamento nos reservatórios e suas regras de ocupação e das restrições operativas hidráulicas formalizadas.

Segundo Palomino (2009) a maior complexidade desta operação é a necessidade de se tomar uma decisão no presente com base em cenários incertos de disponibilidade de água no futuro. Em outras palavras, o planejador deve decidir qual o melhor momento para o despacho de hidrelétricas e termelétricas dadas as possibilidades de abundância ou escassez de água no futuro. Por exemplo, se o planejador decidir pelo despacho das hidrelétricas no presente e no futuro uma seca prejudicar o reabastecimento dos reservatórios, o custo de operação do sistema pode se elevar demais já que a carga terá que ser atendida pelo despacho de térmicas e, nesse caso, o custo de oportunidade de água é baixo, ou seja, o planejador decide poupar os reservatórios hoje e no futuro um período de chuvas ocasiona o derramamento de água, trazendo o desperdício de energia.

Dessa forma, vê-se que duas variáveis fundamentais na decisão do planejador do sistema são o volume de água dos reservatórios, também conhecido como energia armazenada, e as afluências futuras. A incerteza característica de ambas as variáveis faz com que o custo de oportunidade da água se eleve e se reduza, oscilando de acordo com os cenários que se realizam, o que acaba por tornar o processo de decisão estocástico. Com base nisso, fica claro visualizar essas situações em uma árvore de decisões que represente todas as possíveis ocorrências sendo possível, então, escolher aquela que minimize os custos de operação do sistema, a figura 4 representa esta decisão.

---

na existência ou inexistência de sazonalidade e de restrições de vazões máximas. A sazonalidade é definida pelas séries históricas de vazões naturais diárias. (ONS 2020)

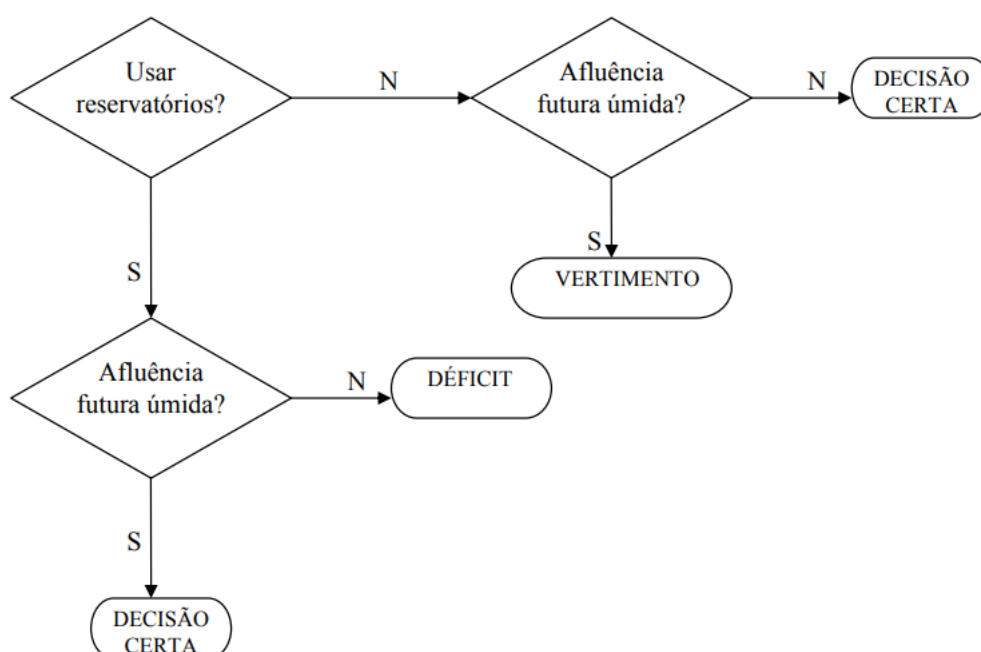


Figura 4 - Fluxograma de decisão de despacho de termelétricas (Fonte: Palomino, 2009)

O despacho em um sistema hidrotérmico deve, portanto, comparar o benefício imediato de se armazenar a água nos reservatórios e o benefício futuro trazido pelo seu armazenamento (OLIVEIRA, 2003). Entretanto ao despachar de maneira centralizada várias usinas que estão localizadas em diferentes bacias com diferentes regimes hidrológicos trouxe a cada estágio de planejamento uma infinidade de cenários no problema, motivando o desenvolvimento de modelos de otimização estocástica que auxiliassem no planejamento do sistema. (PALOMINO, 2009)

#### 2.4.2. A função das termelétricas no SIN

A operação de térmicas atuando na base permite que haja um enchimento mais rápido dos reservatórios das usinas hídricas em períodos úmidos, além de conduzir a uma depleção mais lenta desses reservatórios nos meses de baixa afluência. Por outro lado, é importante para o sistema possuir térmicas de partida rápida específicas para reforçar o atendimento da ponta.

Desta forma as usinas térmicas são classificadas em dois tipos:

- Térmicas inflexíveis: são usinas cujo às suas características técnicas ou em respeito às cláusulas take-or-pay <sup>3</sup>em seus contratos de fornecimento de combustível, requerem uma operação com menor variação, sendo capazes e mais indicadas para operar de forma contínua na base.
- Térmicas flexíveis: são usinas com caráter de despacho controlável, sendo assim podem ser solicitadas pela ONS, quando é necessário para operação de ponta, tendo em vista seus tempos relativamente baixos de partida e parada. (CORRÊA et al., 2017)

### 2.4.3. Diferenciação das fontes termoelétricas

A geração térmica é o processo onde fontes de combustíveis são convertidas em energia térmica, a qual giram uma turbina para produzir eletricidade, o processo é idêntico para qualquer tipo de combustível fonte, estas fontes se diferenciam no modo de criação da energia térmica do processo, para produzir calor o carvão, gás natural, petróleo, diesel e óleo combustível, utilizam reações químicas resultantes da força de ligação dos elétrons que orbitam em torno do núcleo de um átomo, que representa aproximadamente 1% da massa do átomo, já o combustível nuclear utiliza a reação de fissão do núcleo do átomo, liberando a energia armazenada dentro do mesmo, representando 99% da massa do átomo para gerar a energia térmica. Sabendo da relação entre massa e energia através da formula  $E=MC^2$ , fica claro que a reação que utiliza mais massa também é a que gera maior energia.

Porém a diferença não somente se dá através do processo de geração e calor, mas por outros fatores como o custo de implementação, custo variável unitário<sup>4</sup>, emissão de GEE, assim como a velocidade de acionamento, sua capacidade de variação, entre outros fatores. A tabela 1 mostra estas diferenciações.

---

<sup>3</sup> Cláusula de “take or pay” é um mecanismo contratual que assegura o pagamento de uma quantidade mínima de energia elétrica, independentemente do seu consumo.

<sup>4</sup> CVU (Custo Variável Unitário) - Valor, expresso em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh), calculado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE a partir de parâmetros informados pelo proponente vendedor antes do início do leilão e serve de base para definição da garantia física, e dos valores esperados necessário para cobrir todos os custos operacionais do empreendimento, exceto os já cobertos pela receita fixa.

Tabela 1 - Diferenças entre as fontes térmicas

Fonte	Custo de Implementação	Custo variável Unitário	Emissão de GEEs	Características
<b>Carvão</b>	Baixo	Baixo	Muito Alto	Acionamento lento, baixa capacidade de variação, dificuldade de transporte do combustível.
<b>Diesel</b>	Baixo	Muito Alto	Alto	Acionamento rápido, alta capacidade de variação, facilidade de transporte e armazenamento do combustível.
<b>Gás/GNL</b>	Depende da infraestrutura	Depende da concepção do projeto	Médio	Versátil, depende de infraestrutura para acesso ao combustível.
<b>Nuclear</b>	Muito alto	Muito Baixo	Muito Baixo	Acionamento lento, baixa capacidade de variação, restrições de segurança ambiental.
<b>Óleo Combustível</b>	Baixo	Alto	Muito Alto	Acionamento médio, média capacidade de variação, facilidade de transporte e armazenamento do combustível.

Fonte: LAWSON; PEREIRA, 2017.

## 2.5. Ciclo do combustível nuclear

Ciclo do urânio é o nome dado ao processo no qual o mineral do urânio passa até a geração da energia no interior dos reatores, é dividido em duas partes, o *front end*, que são as etapas que ocorrem antes do uso do combustível em um reator e o *back end*, que são as etapas subsequentes.

O ciclo do combustível nuclear pode ser classificado da seguinte forma: aberto, quando não há a etapa de reprocessamento do combustível (figura 5) ou fechado quando o combustível irradiado do reator passa por um reprocessamento e é integrado novamente no ciclo (Figura 6), o ciclo brasileiro é considerado um ciclo aberto já que o país não executa a etapa do reprocessamento.(GONÇALVES, 2015; INB, 2020)



Figura 5 - Fluxograma do Ciclo aberto do combustível nuclear (Fonte: GONÇALVES, 2015).

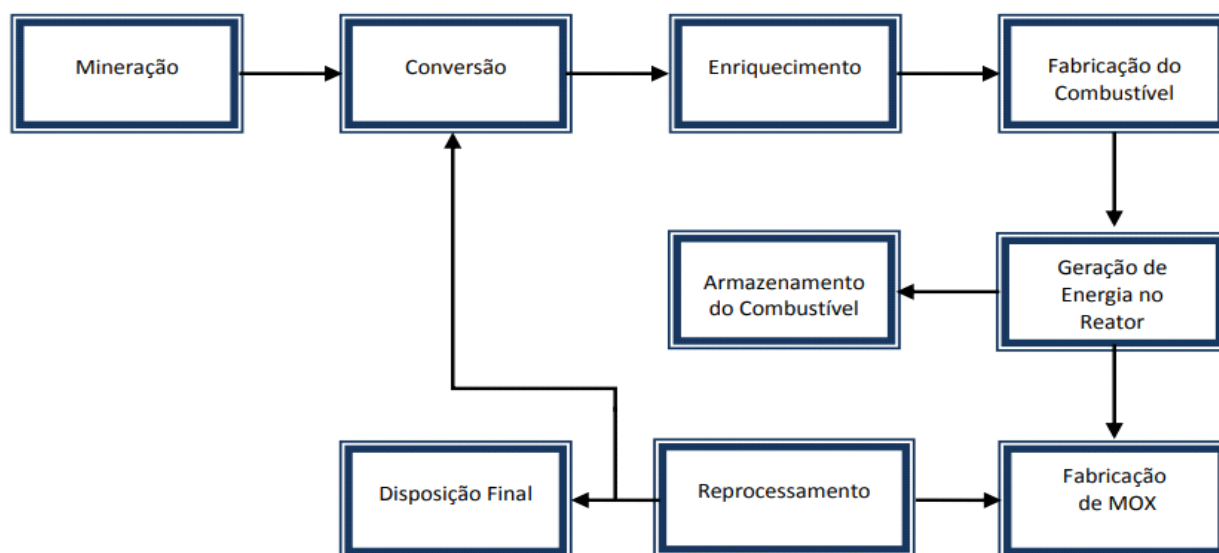


Figura 6 - Fluxograma do Ciclo aberto do combustível nuclear (Fonte: GONÇALVES, 2015).

### 2.5.1. Indústrias Nucleares do Brasil (INB)

A INB é uma empresa estatal vinculada ao Ministério de Minas e Energia, onde exerce, em nome da União, o monopólio da produção e comercialização de materiais nucleares. Também atua na execução de serviços de engenharia do combustível e na produção de componentes dos elementos combustíveis. Atua na cadeia produtiva do minério e no ciclo do combustível nuclear, que inclui a mineração, o beneficiamento, o enriquecimento, a fabricação de pó, pastilhas e do combustível que abastece as usinas nucleares brasileiras (Angra 1 e Angra 2).

As atividades da INB são licenciadas e fiscalizadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), órgão vinculado à Organização das Nações Unidas (ONU), supervisiona a produção, realizando inspeções regulares à Fábrica de Combustível Nuclear. (INB, 2020b)

### 2.5.2. Mineração e Beneficamento

Na etapa de mineração, a rocha contendo urânio é extraído da natureza na forma de minério bruto com fração mássica de 0,71 % do isótopo físsil  $^{235}\text{U}$ , 99,28% de  $^{238}\text{U}$  e 0,00057% de  $^{234}\text{U}$ . Após, ocorre a trituração do minério e o processo de lixiviação ácida para extração do concentrado de urânio, mundialmente conhecido como *yellowcake*. Este concentrado de urânio, o diuranato de amônio (DUA)  $[(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7]$ , é produzido no Brasil pela INB em sua Unidade de Concentrado de Urânio, implantada no município de Caetité, no sudoeste da Bahia. (COSTA, 2018; INB, 2020b)



Figura 7 - Mina de Urânio em Caetité, Bahia (Fonte: Autor).

### 2.5.3. Conversão

O concentrado de urânio (DUA) é convertido em hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ) com a dissolução do diuranato de amônio (DUA) impuro em ácido nítrico para formação do nitrato de uranilo [ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ], que passa por um processo de purificação e posterior precipitação com hidróxido de amônio para obtenção do  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$  puro. As etapas seguintes são a calcinação, redução com  $\text{H}_2$  para obtenção do  $\text{UO}_2$ . Este reage com  $\text{HF}$  para formar o  $\text{UF}_4$  que, por fim, reage com o  $\text{F}_2$  para formação do  $\text{UF}_6$  natural ( $^{235}\text{U} = 0,71\%$ ). Esta etapa do ciclo ainda não é realizada pela INB e necessita de contratação externa para a execução do serviço de conversão. (COSTA, 2018; INB, 2020b)

### 2.5.4. Enriquecimento Isotópico

Após a obtenção do  $\text{UF}_6$  natural é realizada a etapa de enriquecimento isotópico do urânio, na qual o teor de enriquecimento do isótopo  $^{235}\text{U}$  é aumentado de 0,71 a 5%. O Brasil utiliza a tecnologia da ultracentrifugação, onde o gás  $\text{UF}_6$  natural passa por um conjunto de centrífugas que são equipamentos que giram a altíssima velocidade e fazem com que o isótopo mais pesado ( $^{238}\text{U}$ ) caminhe na direção da parede e mais ao fundo, e o mais leve ( $^{235}\text{U}$ ) mais para o centro e ao alto do rotor da máquina, gerando a separação isotópica do urânio. Este efeito elementar de separação é multiplicado inúmeras vezes através da associação em série e paralelo das máquinas gerando as cascatas de ultracentrifugas. Através das cascatas de ultracentrifugas se produzem dois tipos de correntes de urânio, uma contendo o material enriquecido e outra contendo material empobrecido em relação ao isótopo leve ( $^{235}\text{U}$ ), conforme figura 8.

Essa etapa acontece na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN) da INB em Resende/RJ, com tecnologia totalmente nacional desenvolvida através da parceria firmada entre o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

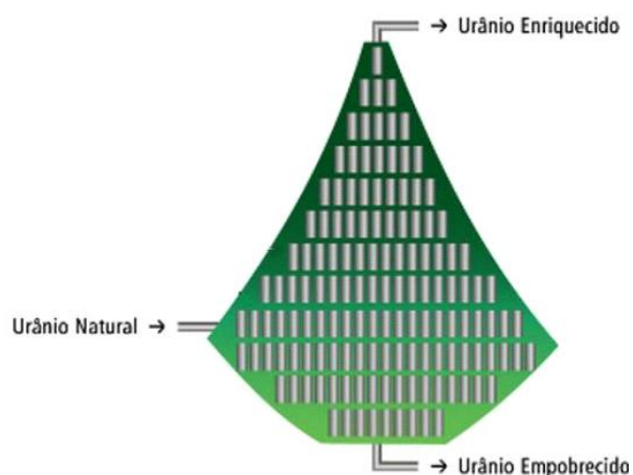


Figura 8 - Cascata de enriquecimento isotópico (Fonte: INB, 2020).

### 2.5.5. Reconversão

A reconversão é a etapa que utiliza o  $UF_6$  enriquecido como matéria-prima para produzir o dióxido de urânio ( $UO_2$ ) em pó. A rota industrial de produção é a via tricarbonato de amônio e urânio [TCAU;  $(NH_4)_4UO_2(CO_3)_3$ ], na qual é realizada a hidrólise básica do  $UF_6$  com posterior redução do TCAU a  $UO_2$  em atmosfera redutora de  $H_2$ . Esta etapa é realizada em sua totalidade na INB-Resende, na denominada FCN-Reconversão. (COSTA, 2018)

### 2.5.6. Fabricação de Pastilhas de $UO_2$

Aproximadamente 1850 kg de pó de  $UO_2$  são homogeneizados por 120 min com 0,20 %p de diestearato de alumínio (ADS), lubrificante sólido usado na compactação, e material reciclado (0 – 12 % de  $U_3O_8$ <sup>5</sup>). O processo de dopagem está inserido exatamente nessa etapa do processamento do combustível nuclear, no qual é adicionado o aditivo químico (dopante) à mistura de pós com posterior homogeneização de todo o material.

<sup>5</sup>  $U_3O_8$ : material reciclado oriundo da oxidação de pastilhas de  $UO_2$  defeituosas/fora do especificado a 380°C, por 17 h em atmosfera oxidante (ar de processo).

Após a formação do lote ocorre a compactação da mistura de pós em pastilhas verdes através de prensa rotativa, com capacidade nominal de produção de 142 pastilhas/min e pressão de compactação aproximada de 400 MPa. Os corpos verdes, com densidades em torno de 5,65 – 5,80 g/cm<sup>3</sup> e não possuem resistência mecânica suficiente para uso como combustível nuclear, portanto precisam ser sinterizados.

A sinterização das pastilhas em escala industrial geralmente ocorre em atmosfera redutora de H<sub>2</sub>, com certo potencial de oxigênio ( $\mu$ ). Através da passagem de uma corrente gasosa de hidrogênio através de um banho hidrostático mantido a uma temperatura constante, denominado umidificador de H<sub>2</sub>. Neste sistema, a corrente gasosa de hidrogênio fica saturado com o vapor d'água e é, então, alimentada no forno de sinterização com um determinado ponto de orvalho<sup>6</sup>, nas elevadas temperaturas de sinterização (1750°C), para ganhar rigidez e adquirir a resistência necessária às condições de operação a que serão submetidas dentro do reator de uma usina nuclear. Após o processo de sinterização as pastilhas adquirem uma densidade na faixa de 10,40 – 10,50 g/cm<sup>3</sup>.

Na última etapa de processamento das pastilhas, as cerâmicas sinterizadas são usinadas em diâmetro uniforme para serem enviadas a fabricação do elemento combustível, todo o processo de fabricação das pastilhas é representado pelo fluxograma da figura 9. (COSTA, 2018; INB, 2020a)

---

<sup>6</sup> Ponto de orvalho designa a temperatura na qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação.

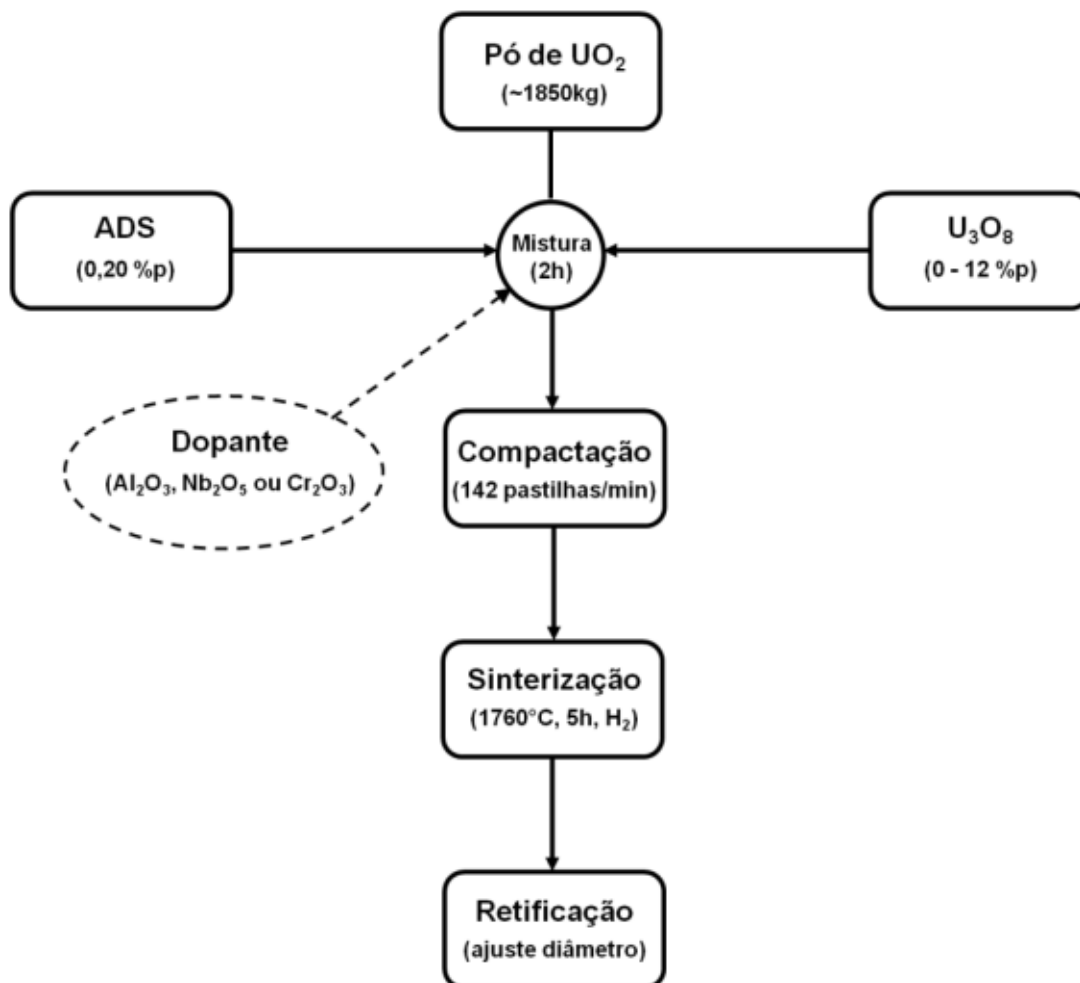


Figura 9 - Fluxograma do processo de fabricação de pastilhas de  $\text{UO}_2$  (Fonte: COSTA, 2018).

### 2.5.7. Montagem do Elemento Combustível

Na montagem do elemento combustível as pastilhas de urânio são empilhadas em varetas de uma liga de zircaloy, um conjunto destas varetas, mantidas rigidamente por grades espaçadoras, formando o elemento combustível, como apresentado na figura 10. (INB, 2020)

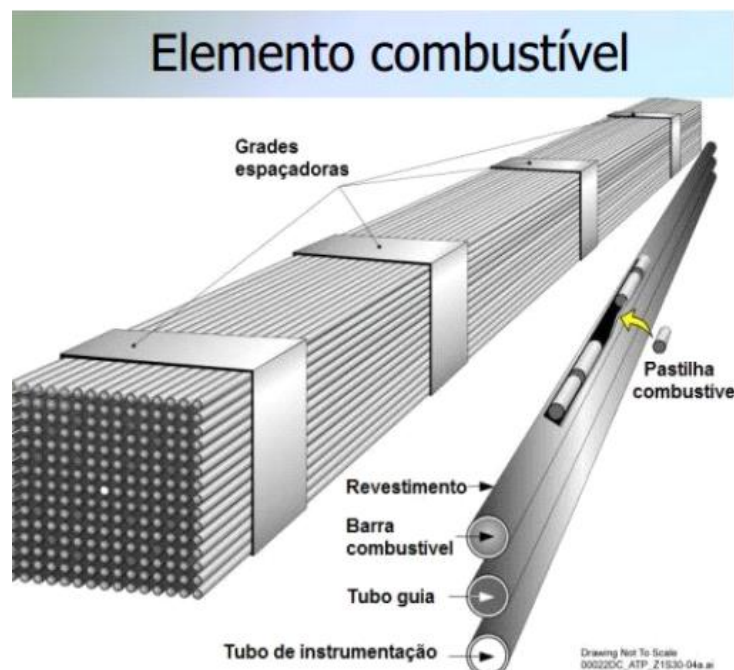


Figura 10 - Elemento combustível (Fonte: INB, 2020).

No Brasil são fabricados dois modelos de elementos combustível diferente, pelo fato das Usinas serem de fabricantes diferentes, onde o elemento combustível da Usina de Angra 1 (Westinghouse) possui 4 metros de comprimento e contém 235 varetas rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por 10 grades espaçadoras, 1 grade protetiva, 20 tubos guias e mais 1 tubo de instrumentação; e dois bocais, um inferior e um superior. Na Usina Angra 2 (Siemens) o elemento combustível possui 5 metros de comprimento e contém 236 varetas rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por 9 grades espaçadoras, 1 grade protetiva, 20 tubos guias e dois bocais, um inferior e um superior. (INB, 2020b)

### 2.5.8. Geração Elétrica

Após a Fabricação do elemento combustível, este é instalado no núcleo do reator e se inicia a etapa de produção de energia na usina, tipicamente, o período entre as recargas varia de 12 a 18 meses. (GONÇALVES, 2015)

A geração termonuclear é um processo que envolve a geração de vapor d'água em alta pressão, que ao expandir, aciona uma turbina, movimentando um gerador

elétrico acoplado ao seu eixo, o vapor sai da turbina em baixa pressão onde é resfriado, condensado e novamente aquecido, reiniciando o ciclo térmico. No interior do núcleo do reator, onde se encontra o combustível nuclear, há uma reação de fissão nuclear<sup>7</sup> dos átomos de urânio-235, iniciado com um bombardeamento de nêutrons, onde cada átomo fissionado emite dois ou três nêutrons, gerando assim uma reação em cadeia controlada no qual existe um moderador, que garante o nível de energia dos nêutrons adequado para o processo e também o fluido de resfriamento, que absorve o calor formado e o leva ao exterior do reator para o processo térmico. (VEIGA, 2011)

### 2.5.9. Tecnologia nuclear

A tecnologia nuclear para a geração de eletricidade vem evoluindo desde à época pós 2ª Guerra Mundial. Os avanços têm sido classificados em gerações de projetos das usinas nucleares e indicam principalmente as características tecnológicas dos critérios de segurança de projeto buscando minimizar a probabilidade de ocorrência e mitigar eventuais consequências de um acidente nuclear. (SANTOS, 2014)

- Geração I são consideradas como usinas protótipos de demonstração industrial e usinas de produção de eletricidade desenvolvidas nas décadas de 1950 e 1960, quando alguns países passaram a desenvolver programas nucleares para a geração de energia elétrica. (GOLDBERG; ROSNER, 2011; SANTOS, 2014)
- Geração II são usinas comerciais, projetados com o objetivo de serem econômicos e confiáveis, e que começaram a operar em geral no final da década de 1960, com uma expectativa vida útil de 40 anos. (GOLDBERG; ROSNER, 2011; SANTOS, 2014)
- Geração III são usinas que incluem diversas evoluções tecnológicas em relação à geração anterior, como por exemplo, a tecnologia de combustível, eficiência térmica, construção modularizada, a prioridade por sistemas de

---

<sup>7</sup> Fissão nuclear é o rompimento do núcleo de um átomo, átomos mais instáveis como o urânio, ao serem chocados com nêutrons aumentam sua instabilidade no núcleo acarretando sua quebra em dois fragmentos compostos de novos núcleos, esta reação libera uma grande quantidade de energia.

segurança passivos ao invés de ativos. (ABRAM; ION, 2008; GOLDBERG; ROSNER, 2011; SANTOS, 2014)

- Geração III+ são usinas que incluem, as características dos reatores de geração III, além de dispositivos inovadores de segurança intrínseca, como resfriamento passivo por circulação natural, e a incorporação em alguns projetos de dispositivos de segurança passivos que não requerem controles ativos ou de ação do operador, mas considera a força da gravidade e a convecção natural na mitigação dos impactos de eventos anormais. (ABRAM; ION, 2008; SANTOS, 2014)
- Geração IV são usinas ainda em projeto de pesquisa e desenvolvimento que deverão iniciar sua implantação entre 2020 e 2030, esta geração de usina tem como principal objetivo ter impacto ambiental positivo, aumento da segurança, custo baixo e períodos mais curtos de construção. (KONIGAME; CONTI, 2017; VEIGA, 2011)

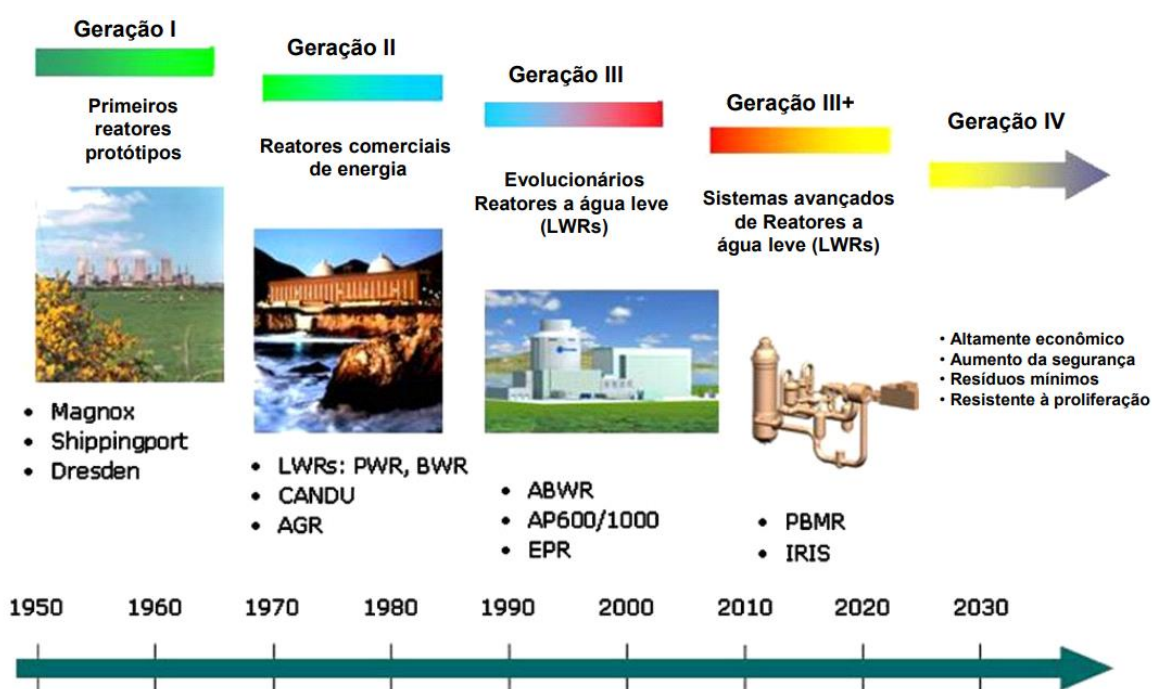


Figura 11 - Gerações tecnológicas dos reatores nucleares (Fonte: KONIGAME; CONTI, 2017).

### 2.5.10. Tipos de reatores

Os reatores se distinguem em função do tipo de moderador e refrigerador utilizado, ou então na energia dos nêutrons de fissão, que podem ser nêutrons térmicos (que necessitam de moderadores) ou nêutrons rápidos que não necessitam de moderadores.

Segundo a IAEA<sup>8</sup> há 443 usinas nucleares em operação no mundo, onde se utilizam diferentes tipos de reatores como mostra no gráfico da figura 12. As tecnologias mais utilizadas nas usinas atualmente ainda são as de geração II, do tipo PWR desenvolvido pela *Westinghouse* e o BWR desenvolvido pela *General Electric*.

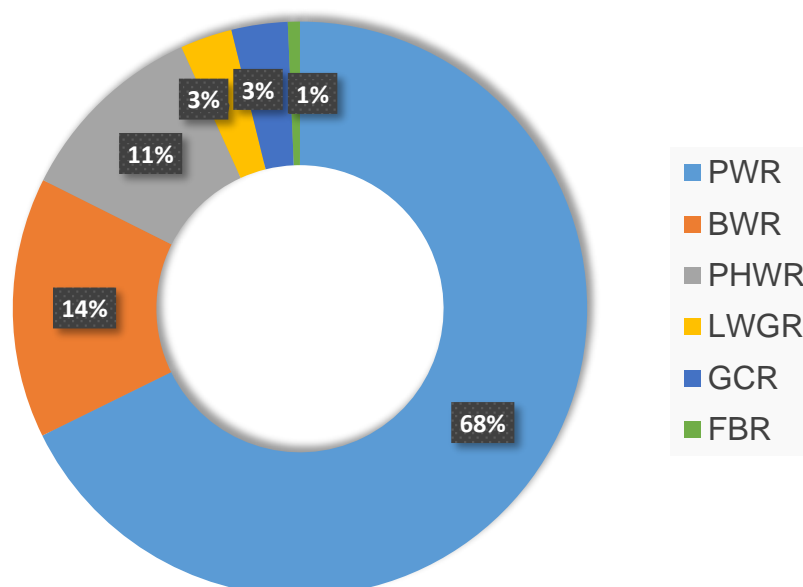


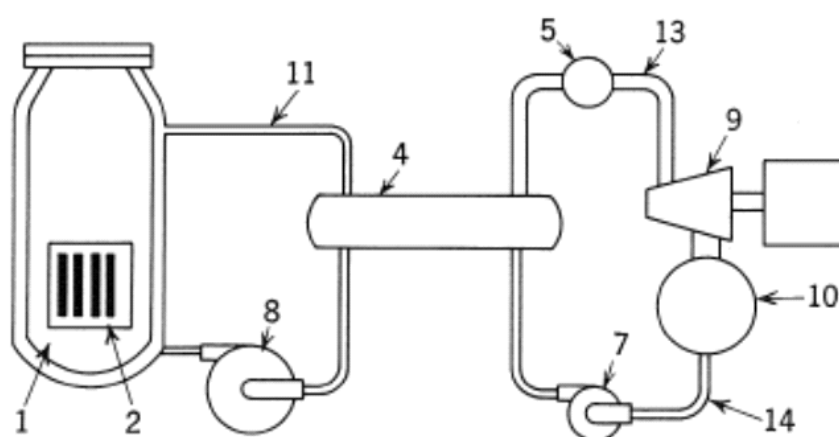
Figura 12 - Tipos de reatores em operação no mundo (Fonte: Nuclear Power Reactors in the World, 2020).

#### 2.5.10.1. Pressurised Water Reactor (PWR)

Neste tipo de reator a água leve atua tanto como refrigerante do núcleo quanto como moderador de nêutrons. O líquido é mantido em pressão suficiente para não vaporizar e há troca de calor com um circuito secundário, onde é formado o vapor que

<sup>8</sup> IAEA: International Atomic Energy Agency

aciona a turbina, movimentando o gerador elétrico. A necessidade de se estabelecer alta pressão no sistema primário para evitar a vaporização do refrigerante aumenta os custos do reator tipo PWR em função dos requisitos das características estruturais do sistema primário e do vaso do reator. Da mesma forma um reator tipo PWR exige componentes específicos como o pressurizador e os geradores de vapor aumentando o custo das usinas nucleares que utilizam este tipo de reator. Conforme apresentado no diagrama esquemático da Figura 13. (SANTOS, 2014; VEIGA, 2011; WILLS, 1967)



- |                                    |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Reator                          | 8. Bomba de Circulação            |
| 2. Núcleo                          | 9. Turbo Gerador                  |
| 3. Camada Envoltória               | 10. Condensador                   |
| 4. Gerador de Vapor                | 11. Refrigerante do Primário      |
| 5. Secador de Vapor                | 12. Refrigerante do Intermediário |
| 6. Trocador de Calor Intermediário | 13. Vapor                         |
| 7. Bomba de Água de Alimentação    | 14. Condensado                    |

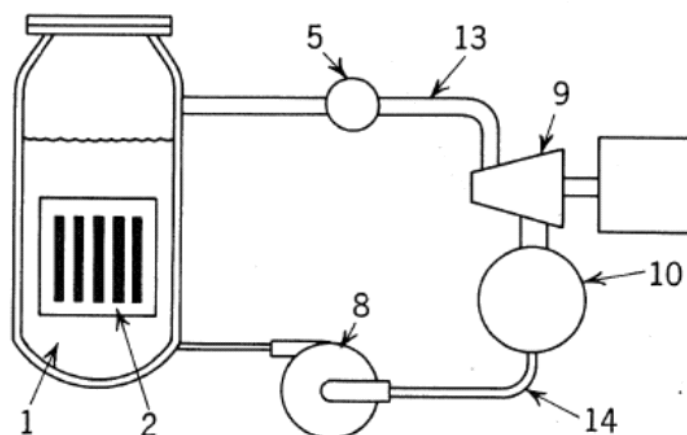
Figura 13 - Reator a Água Pressurizada (Fonte: WILLS, 1967).

### 2.5.10.2. Boiling Water Reactor (BWR)

Assim como no reator tipo PWR, a água leve atua neste tipo de reator como moderador e como fluido refrigerante e o combustível utilizado é o urânio enriquecido. A água do circuito primário é vaporizada e aciona diretamente a turbina do gerador, neste caso há menos equipamentos (bombas, trocadores de calor e equipamentos auxiliares) envolvidos no processo, conforme a Figura 14, porém a radioatividade<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Radioatividade trata-se de um fenômeno natural ou artificial, pelo qual substâncias ou elementos químicos emitem partículas alfa ou beta, e raios gama (raio X).

gerada pelo processo tem propagação maior, atingindo também a turbina e o condensador. (SANTOS, 2014; VEIGA, 2011; WILLS, 1967)



- |                                    |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Reator                          | 8. Bomba de Circulação            |
| 2. Núcleo                          | 9. Turbo Gerador                  |
| 3. Camada Envoltória               | 10. Condensador                   |
| 4. Gerador de Vapor                | 11. Refrigerante do Primário      |
| 5. Secador de Vapor                | 12. Refrigerante do Intermediário |
| 6. Trocador de Calor Intermediário | 13. Vapor                         |
| 7. Bomba de Água de Alimentação    | 14. Condensado                    |

Figura 14 - Reator a Água Fervente (Fonte: WILLS, 1967).

### 2.5.10.3. Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR)

Este tipo de reator utiliza o mesmo princípio básico dos reatores PWR quanto ao critério de separação entre os circuitos primário e secundário. Possui como principal característica a utilização de deutério como moderador ao invés da água leve utilizada nos reatores tipo PWR e BWR.

A utilização de deutério<sup>10</sup> como moderador possibilita o uso de urânio natural como combustível, ao invés de urânio enriquecido, tornando assim desnecessário o processo de enriquecimento de combustível, apesar da água pesada ser utilizada tanto como refrigerante como moderador, existem dois circuitos completamente independentes, um com água pesada para refrigeração do núcleo do reator e outro

<sup>10</sup> O deutério é um isótopo do hidrogênio cujo núcleo possui um nêutron. Chamado de água pesada.

com água pesada para moderação do fluxo de nêutrons. O reator tem uma constituição horizontal na qual o núcleo fica em uma calandria e o combustível fica em tubos de pressão horizontais, a água pesada utilizada como moderador fica por fora dos tubos de pressão nos quais estão localizados o combustível e por onde passa o fluxo de água pesada que atua como refrigerante, conforme ilustra a Figura 15. Este tipo de reator permite o reabastecimento de combustível com a usina em operação. Para tal são utilizados dois equipamentos, cada um deles localizado em cada lado da calandria de tal forma que enquanto um equipamento insere de um lado o combustível novo no tubo de pressão, o equipamento do outro lado remove o combustível usado sendo deslocado. (GLASSTONE; SESONSKE, 2012; SANTOS, 2014)

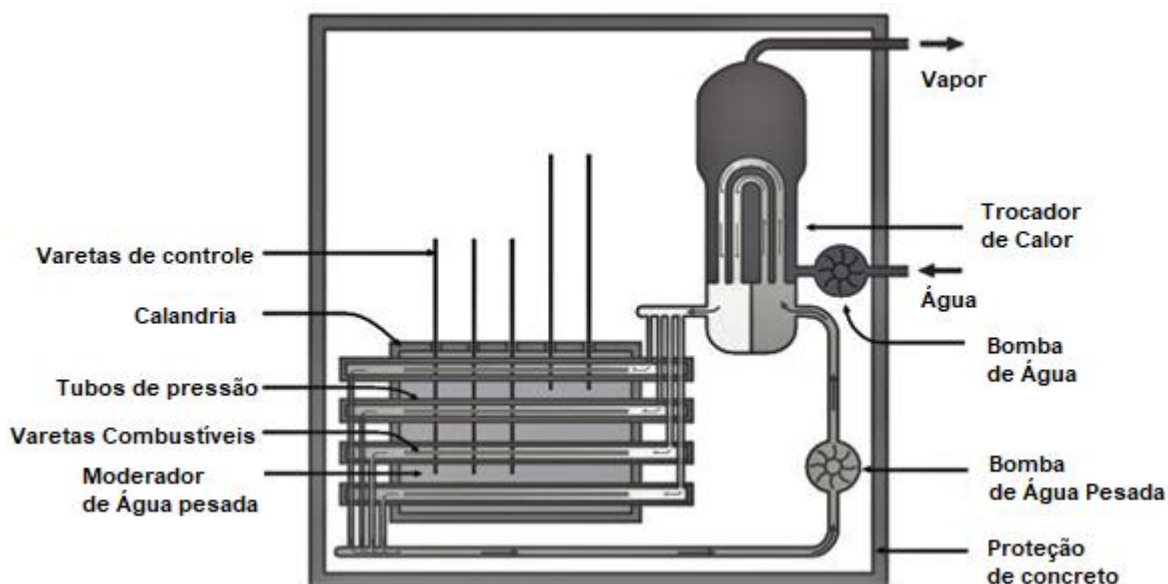


Figura 15 - Reator a Água Pesada (Fonte: Autor)

#### 2.5.10.4. Light Water Graphite Reactor (LWGR)

Os reatores do tipo LWGR são refrigerados a água leve fervente em um ciclo único de água/vapor, como os reatores do tipo BWR de ciclo direto e moderados a grafite em um complexo projeto de tubo de pressão com separação entre o refrigerante e o moderador no núcleo do reator, apresenta também semelhanças com os reatores à água pesada (PHWR).

Possuem aproximadamente 1900 tubos de pressão verticais, cada um contendo um par de elementos combustíveis ou de barra de controle. Os tubos de pressão são revestidos por uma camada de grafite que serve como moderador. A água que entra pelo fundo do vaso do reator passa pelo interior dos tubos de pressão e vaporizam durante o processo de remoção de calor do combustível. O vapor gerado é utilizado em uma das duas turbinas. (SANTOS, 2014)

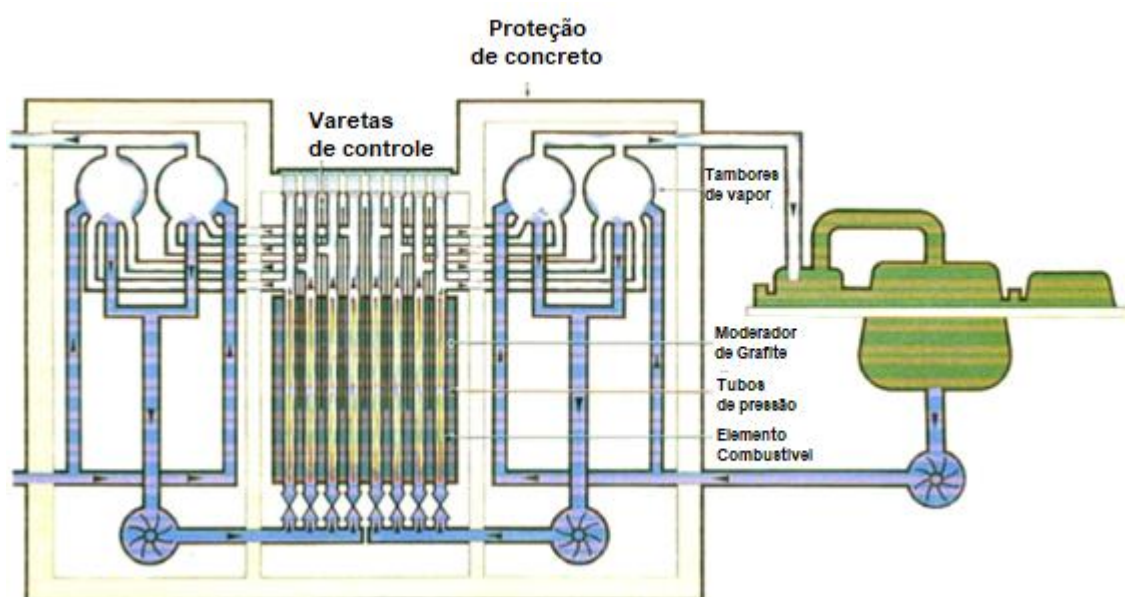


Figura 16 - Reator Refrigerado a Água Leve e Moderado a Grafite (Fonte: SANTOS, 2014).

#### 2.5.10.5. Gas-Cooled Reactor (GCR)

Os reatores tipo GCR são refrigerados a gás  $\text{CO}_2$  e moderados com grafite, se dividem em dois modelos, os que utilizam urânio natural como combustível (Figura 17) e os chamados AGR (Advanced Gas-cooled Reactor) que utilizam urânio levemente enriquecido como combustível (Figura 18) ambos os esquemas utilizam geradores a vapor que transferem o calor do gás para a água em um circuito secundário. (SANTOS, 2014)

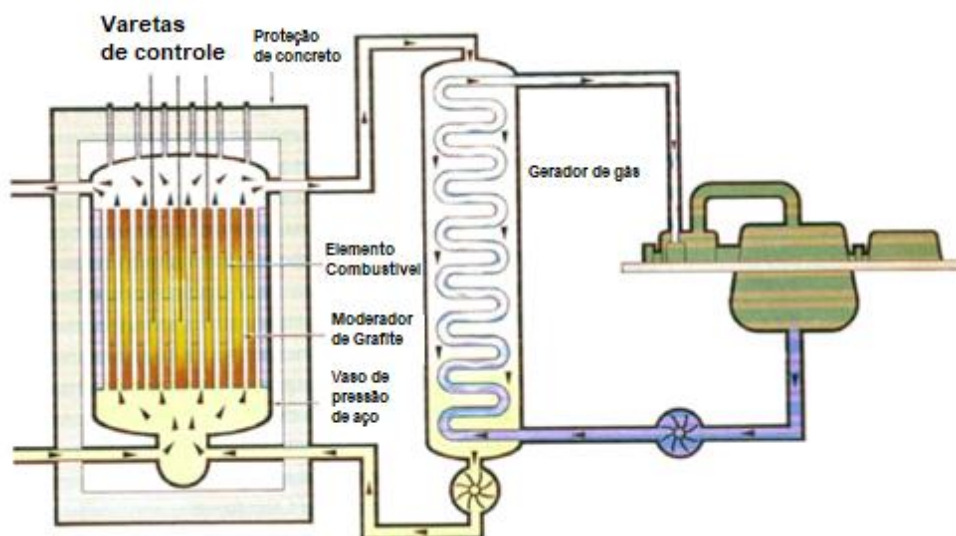


Figura 17 - Reator Básico Refrigerado a Gás (Fonte: SANTOS, 2014).

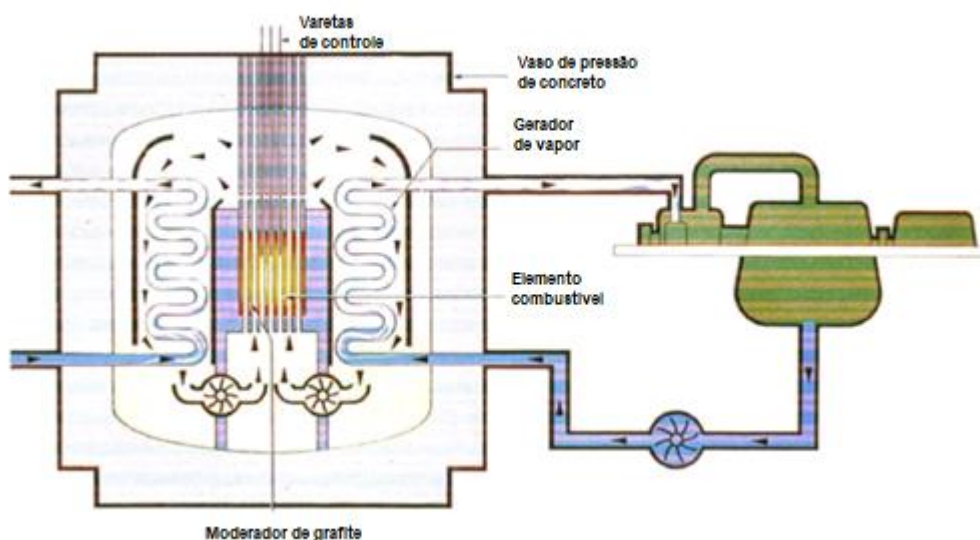


Figura 28 - Reator Avançado Refrigerado a Gás (Fonte: SANTOS, 2014)

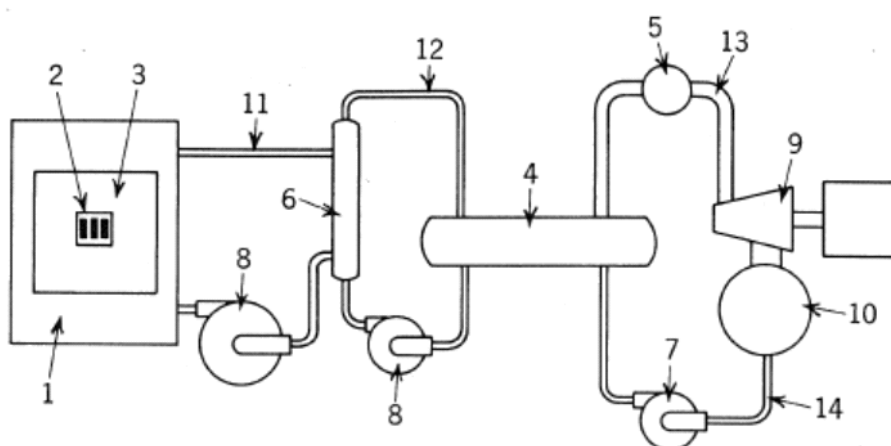
### 2.5.10.6. Fast Breeder Reactor (FBR)

Os reatores do tipo FBR não utilizam moderadores, pois necessitam dos nêutrons rápidos para realizar fissões, o sódio líquido é usado como refrigerador já que possui boas propriedades térmicas e não é um bom absorvedor de nêutrons.

O reator do tipo FBR tem três loops sendo dois de sódio e um de água (Figura 19). O loop intermediário de sódio, além de transferir calor para o gerador de vapor, objetiva isolar o loop do primário do loop de água, uma vez que o sódio do primário se

torna radioativo em função da absorção neutrônica e também pode reter produtos de fissão do combustível.

O reator é projetado para produzir mais material físsil do que está sendo consumido para gerar calor. Para este propósito a utilização de plutônio físsil e urânio fértil como combustível, como os nêutrons rápidos são mais efetivos pode se utilizar tanto urânio natural, quanto urânio enriquecido.



- |                                    |                                   |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Reator                          | 8. Bomba de Circulação            |
| 2. Núcleo                          | 9. Turbo Gerador                  |
| 3. Camada Envoltória               | 10. Condensador                   |
| 4. Gerador de Vapor                | 11. Refrigerante do Primário      |
| 5. Secador de Vapor                | 12. Refrigerante do Intermediário |
| 6. Trocador de Calor Intermediário | 13. Vapor                         |
| 7. Bomba de Água de Alimentação    | 14. Condensado                    |

Figura 39 - Reator Regenerador Rápido (Fonte: SANTOS, 2014).

### 2.5.11. Reprocessamento

O combustível irradiado é altamente radioativo, na sua composição existe grande parte do  $^{238}\text{U}$  original, entre 0,6% e 0,8% de  $^{235}\text{U}$  e parte do  $^{238}\text{U}$  gera o plutônio ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  e  $^{242}\text{Pu}$ ).

Os isótopos presentes no combustível irradiado podem ser reaproveitados através do reprocessamento. Após essa etapa os isótopos de urânio e o plutônio recuperados podem ser usados em usinas novamente. Após o reprocessamento, dependendo do propósito, o urânio pode ser enviado diretamente para a fábrica de elementos combustíveis ou para uma planta de enriquecimento ou simplesmente ser

armazenado. O plutônio é enviado para fábricas de combustível que produzem o MOX (Mixed-Oxide Fuel – Combustível de Óxido Misto). O MOX é um combustível nuclear produzido com uma mistura de óxidos de plutônio e urânio que pode ser reusado no reator. (GONÇALVES, 2015)

### **2.5.12. Armazenamento**

O combustível removido do núcleo do reator após a geração de energia (combustível irradiado) ainda produz calor devido ao decaimento radioativo dos produtos de fissão e deve ser resfriado. Normalmente estes combustíveis são armazenados, inicialmente em racks instalados dentro de piscinas especiais, que são grandes reservatórios com 7 metros de água borada que permite a troca de calor, removendo assim o calor residual e também tem a função de blindagem, para reduzir a radiação a níveis adequados localizado dentro do próprio sítio da usina. (ELETRONUCLEAR, 2020b; GONÇALVES, 2015)

### **2.5.13. Disposição Final**

Os operadores (usinas nucleares) têm sob sua responsabilidade a armazenagem intermediária dos elementos combustíveis, para posterior envio a um depósito final que é de responsabilidade exclusiva da CNEN de acordo com a lei 10.308/2001 onde este elemento será mantido até sua atividade<sup>11</sup> seja segura ao ser humano e ao meio ambiente. (ELETRONUCLEAR, 2020b; VEIGA, 2011)

## **2.6. Rejeitos Nucleares**

Rejeito radioativo é todo e qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites estabelecidos por norma, cuja reutilização seja imprópria ou não prevista. (ELETRONUCLEAR, 2020b)

---

<sup>11</sup> Atividade de um radionuclídeo é a quantidade que exprime o grau de radioatividade ou o potencial de produção de radiação de uma determinada quantidade de material radioativo.

Os rejeitos radioativos são classificados em três tipos, segundo o nível de radioatividade que apresentam: os de baixa, média e alta atividade.

- Os rejeitos de baixa atividade (Low Level Waste-LLW) são aqueles rejeitos que contém baixas intensidades de radioatividade, com quantidades desprezíveis de radionuclídeos de meia vida<sup>12</sup> longa. Estes rejeitos não requerem blindagem para o seu manuseio e transporte e podem ser descartados por enterramento de baixa profundidade. Eles tipicamente compreendem papéis, flanelas, panos de limpeza, peças de vestuário, filtros, etc., de hospitais, centros de pesquisas, instalações industriais e usinas nucleares. Em vários países existem sítios para a deposição final dos rejeitos LLW. Com a finalidade de redução de seus volumes, estes rejeitos são usualmente compactados ou incinerados antes da deposição final.
- Os rejeitos de média atividade (Intermediate Level Waste-ILW) são aqueles rejeitos que contém radioatividade mais alta e, portanto, necessitam de blindagem contra as radiações deles emanadas. Eles compreendem tipicamente as resinas iônicas, as lamas químicas e os revestimentos metálicos do combustível, bem como os equipamentos contaminados e rejeitos das operações de desmonte de instalações nucleares. O tratamento e a deposição dos rejeitos do tipo ILW variam, dependendo da forma dos rejeitos e se eles contêm radionuclídeos de meia vida curta ou longa. Muitos são solidificados ou imobilizados em materiais inertes, tal como o concreto ou o betume. Em geral, a deposição dos rejeitos ILW de meia vida curta pode ser realizada por enterramento de baixa profundidade. A deposição dos rejeitos ILW de vida longa deve, entretanto, ser realizada de maneira similar à dos rejeitos de alta atividade, após o necessário tratamento.
- Os rejeitos de alta atividade (High Level Waste-HLW) são aqueles rejeitos resultantes das operações do reprocessamento (tratamento químico do combustível irradiado e descarregado do reator após a produção de energia

---

<sup>12</sup> A meia-vida corresponde ao tempo necessário para que metade dos núcleos radioativos desintegre-se, ou seja, é o tempo que leva para uma amostra radioativa reduzir-se à metade.

para retirada de combustível não utilizado), na maioria líquidos que contém produtos de fissão, ou, se não houver reprocessamento, o próprio combustível completo descarregado dos reatores. Os rejeitos HLW são altamente radioativos e contém atividade de longa vida. Eles geram quantidades consideráveis de calor e necessitam resfriamento por muitos anos. Os rejeitos líquidos do reprocessamento são incorporados em blocos de vidro (solidificados) para a eventual deposição. Se a deposição direta dos elementos combustíveis for a escolhida, o combustível deve ser encapsulado para a deposição. Em ambos os casos, deve-se considerar um período de esfriamento de 20 a 50 anos, antes que a deposição final possa ser realizada. Durante este período, os rejeitos HLW são mantidos em instalações de armazenamento intermediário. Muitos países estão trabalhando com o objetivo da deposição final destes rejeitos em depósitos subterrâneos de 200 a 1000 m de profundidade em formações geológicas adequadas (p.ex.: granito) (PNE 2030, 2007).

## **2.7. Salvaguarda Nuclear**

O objetivo das Salvaguardas Nucleares é identificar o desvio de quantidades significativas de materiais nucleares de atividades pacíficas para fabricação de armas ou explosivos nucleares, assim como confirmar a ausência de produção não declarada de material enriquecido a níveis maiores que o máximo permitido.

São executados um conjunto de procedimentos e medidas para detectar oportunamente, e com razoável grau de certeza, qualquer desvio de quantidades significativas de materiais nucleares para fabricação de armas nucleares ou explosivos, ou para o uso inadequado em atividades não declaradas. Estes procedimentos são definidos em Acordos Internacionais para o controle e a contabilidade do material nuclear no mundo. A quantidade aproximada de material nuclear com a qual não se pode excluir a possibilidade de ser fabricada uma arma nuclear é mostrado na tabela 2. (INB, 2020a)

Tabela 2 - Relação material/quantidade de desconfiança de uso não pacífico

Material de uso direto		Material de uso indireto	
Material	Quantidade	Material	Quantidade
Plutônio com menos de 80% de $^{238}\text{Pu}$	8 Kg de Pu total	Urânio com baixo enriquecimento < 20%	75 Kg de $^{235}\text{U}$ contido
Urânio com alto enriquecimento >20%	25 Kg de $^{235}\text{U}$ contido	Urânio Natural	10 t de U total
Urânio 233	8 Kg de $^{233}\text{U}$	Urânio Empobrecido	20 t de U total
		Tório	20 t de Th total

Fonte: INB, 2020.

### 3. ANÁLISE

#### 3.1. Segurança energética

O Brasil, apesar de ser um dos maiores geradores de eletricidade bruta do mundo, ocupando a oitava posição em 2018 segundo o IEA, o consumo per capita brasileiro ocupa ainda a septuagésima quarta posição com 2,6 MWh/hab, abaixo da média mundial de 3,3 MWh/hab e muito abaixo da média dos países da OCDE 8,0 MWh/hab ou até mesmo inferior aos países Sul Americanos com o índice de desenvolvimento humano (IDH) acima de 0,8, demonstra o desafio do brasileiro em aumentar sua geração elétrica. Para que alcance a média mundial de demanda per capita seria necessário o aumento de 30% sua geração bruta de energia elétrica, aproximadamente 152,97 TWh se baseando em dados do IEA de 2018.

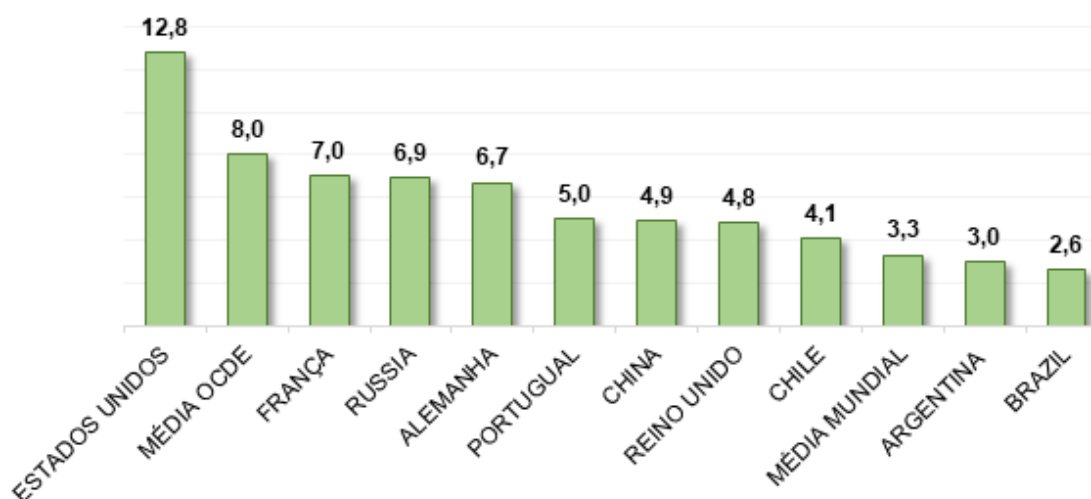


Figura 20 - Demanda per Capta 2018, MWh/hab (Fonte: IEA, 2020)

Em paralelo com o desafio de expansão da geração elétrica, o Brasil cuja sua matriz é muito dependente da fonte hidráulica, de modo que variações mais bruscas nos índices pluviométricos prejudicam a sua geração de energia, vem perdendo gradativamente sua capacidade de regularização dos reservatórios e quanto menor o grau de regularização, maior será sua dependência de períodos chuvosos para o seu reenchimento a cada ciclo hidrológico anual e maior será o seu esvaziamento a cada final de estação seca.

De acordo com a ONS desde o final da década de 1990, não entraram em operação novas hidrelétricas com grandes reservatórios de regularização plurianual. Esses reservatórios são formados através do represamento das águas dos rios, por

meio da construção de barragens. Servem para armazenar a água e criar o desnível necessário para a operação da usina.

O potencial hidrelétrico brasileiro total é da ordem de 246,2 GW, segundo o Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), 43,62% deste potencial estão em plena operação em 2018, do potencial remanescente (inventário mais o valor estimado) a maior parcela se encontra na região norte do país onde há uma forte restrição sócio ambiental para a construção de reservatórios e para a topografia da região amazônica de planícies, seria necessário grandes áreas de alagamento para gerar volumes modestos de energia. A tendência da expansão da geração hídrica é por hidrelétricas de fio d'água, ou seja, reduzindo cada vez mais a capacidade de regularização da oferta hídrica ao longo do ano e aumentando cada vez mais o impacto da sazonalidade na geração hídrica.

Portanto, cada vez mais a matriz elétrica aumentará a participação de fontes alternativas para complementação da geração elétrica, porém pela sua natureza intermitente<sup>13</sup> fontes renováveis como solar e eólica acabam possuindo um baixo fator de capacidade<sup>14</sup> (FC) entre 30 a 47% de acordo com a CCEE e não servem para geração de energia base, assim sendo, o déficit da capacidade de regularização da oferta hídrica é compensada pelas usinas térmicas como mostra a figura 21.

Ao longo de 13 anos a média da energia armazenada (EAR) nos reservatórios do SIN vem caindo gradualmente e a participação da hidráulica na matriz elétrica acompanha esta queda, ao passo que as fontes térmicas aumentam sua participação no mesmo período.

---

<sup>13</sup> Fontes de energia intermitente – Recurso renovável que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração, não pode ser armazenado em sua forma original. (ANEEL, 2020)

<sup>14</sup> Fator de Capacidade é uma medida de desempenho de uma fonte de energia durante um período, calculada como porcentagem de seu potencial energético total.

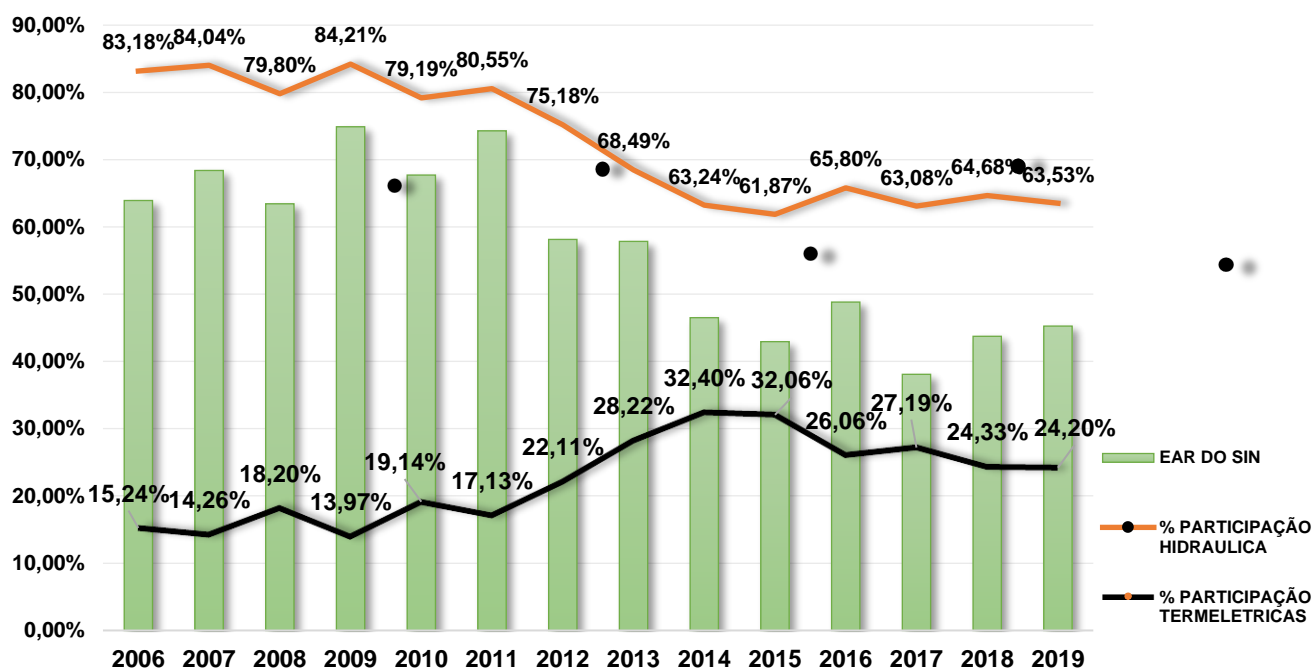


Figura 21 - Relação entre a energia armazenada nos reservatórios com a participação hidráulica e térmica na matriz elétrica (Fonte: EPE, 2020)

As térmicas com vocação de geração base, não apenas são essenciais para a garantia do suprimento em uma base razoável de custos, como podem até mesmo contribuir com o equilíbrio no balanço de potência do sistema. Ao gerarem na base, essas usinas térmicas criam condições mais propícias para usinas hidroelétricas modularem a carga de forma a atender a ponta, não obstante, a geração térmica na base durante o período seco torna o ritmo de deplecionamento dos reservatórios mais lento.

Dentre as usinas térmicas que suprem energia elétrica para o sistema, as usinas nucleares estão entre as primeiras a serem despachadas em função de possuírem o menor Custo Variável Unitário (CVU)<sup>15</sup>, ou seja, o menor custo marginal de geração (figura 22).

<sup>15</sup> CVU (Custo Variável Unitário) - Valor, expresso em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh), calculado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE a partir de parâmetros informados pelo proponente vendedor antes do início do leilão e serve de base para definição da garantia física, e dos valores esperados necessário para cobrir todos os custos operacionais do empreendimento, exceto os já cobertos pela receita fixa.

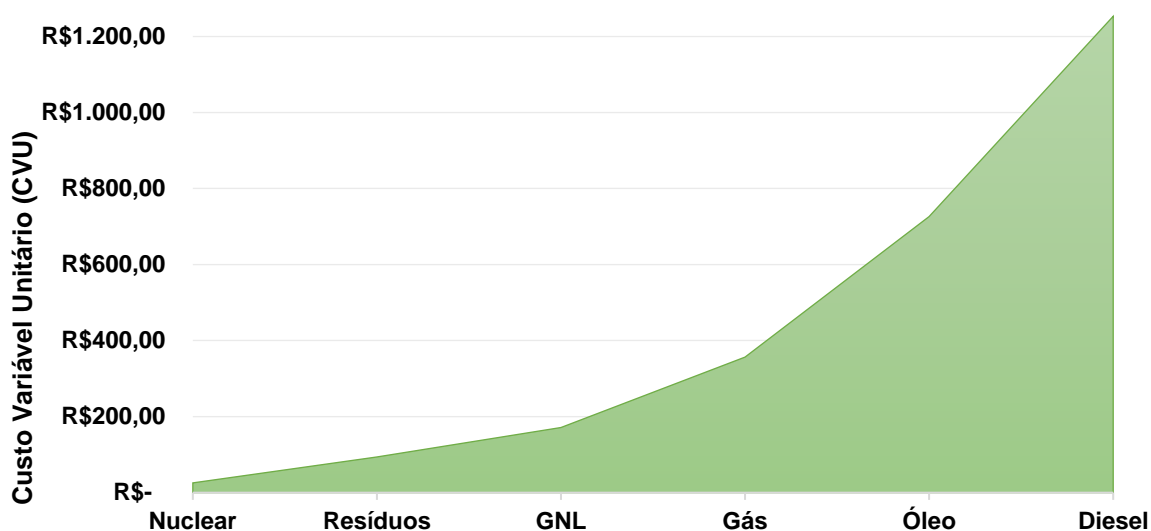


Figura 22 - Curva do CVU por fonte térmica (Fonte: ONS, 2020)

Neste caso, as usinas nucleares são despachadas de forma a operar com nível de potência superior ao limite de inflexibilidade de 80% declarado ao ONS, podendo atingir 100% de potência, o restante dos despachos de usinas térmicas é indicado por ordem de mérito, considerando o CVU de cada fonte.

O operador despacha primeiro as usinas de menor custo variável de operação, o que faz com que algumas fontes térmicas fiquem inoperantes durante grandes períodos de tempo reduzindo seus fatores de capacidade.

Tabela 3 - Fator de Capacidade médio das fontes primárias do SIN

Fonte	Fator de Capacidade
<b>Nuclear</b>	90%
<b>Carvão</b>	57%
<b>Gás Natural</b>	46%
<b>Hidráulica</b>	43%
<b>Biomassa</b>	41%
<b>Eólica</b>	38%
<b>Solar</b>	22%
<b>Derivados de Petróleo</b>	16%

Fonte: EPE, 2020

Enquanto as usinas nucleares têm operado na prática com FC na ordem de 90%, as demais fontes térmicas que compõem o sistema apresentam FC reduzidos e muito inferiores ao das usinas nucleares, como é o caso do gás natural (46%), do carvão (57%) e da biomassa (41%). Observa-se ainda que o FC médio das hidrelétricas brasileiras foi em 2018 na ordem de 43% e o das eólicas 38% no mesmo período.

A partir do exposto acima, observa-se que dentre as opções térmicas existentes no país, a geração nucleoeleétrica apresenta significativa vantagem comparativa no que concerne à segurança energética do país, pois consegue produzir grandes blocos de energia com uma baixa variação nos custos e a geração não depende de sazonalidade, permitindo gerar energia elétrica na base do SIN.

### **3.2. Impacto dos Gases de Efeito Estufa**

Em setembro de 2016, o Brasil tornou-se signatário do Acordo de Paris<sup>16</sup>, comprometendo-se em reduzir até 2025, 37% das emissões de gases do efeito estufa (GEE) registradas em 2005, e uma subsequente redução de 43% até 2030. Além disso, registrou o compromisso de até 2030 reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como manter uma parcela de 45% de fontes de energias renováveis na composição de sua matriz energética.

Com relação ao setor elétrico brasileiro, por sua característica fundamentalmente renovável, ele detém uma das menores taxas de emissão de gases de efeito estufa quando comparado aos demais setores. Entretanto, é possível perceber uma tendência de crescimento significativa das emissões de GEE no setor elétrico brasileiro ao longo dos últimos 15 anos. A Figura 23 apresenta a evolução da emissão de equivalentes de CO<sub>2</sub> no setor elétrico brasileiro. Considerando a futura necessidade de expansão da participação das termelétricas na matriz elétrica brasileira, a taxa de emissão de GEE tende a crescer cada vez mais.

---

<sup>16</sup> Acordo de Paris, considerado o sucessor do protocolo de kyoto, foi aprovado por 195 países para reduzir emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável. O compromisso ocorre com objetivo de manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de buscar esforços para limitar este aumento de temperatura em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. (MMA, 2020)

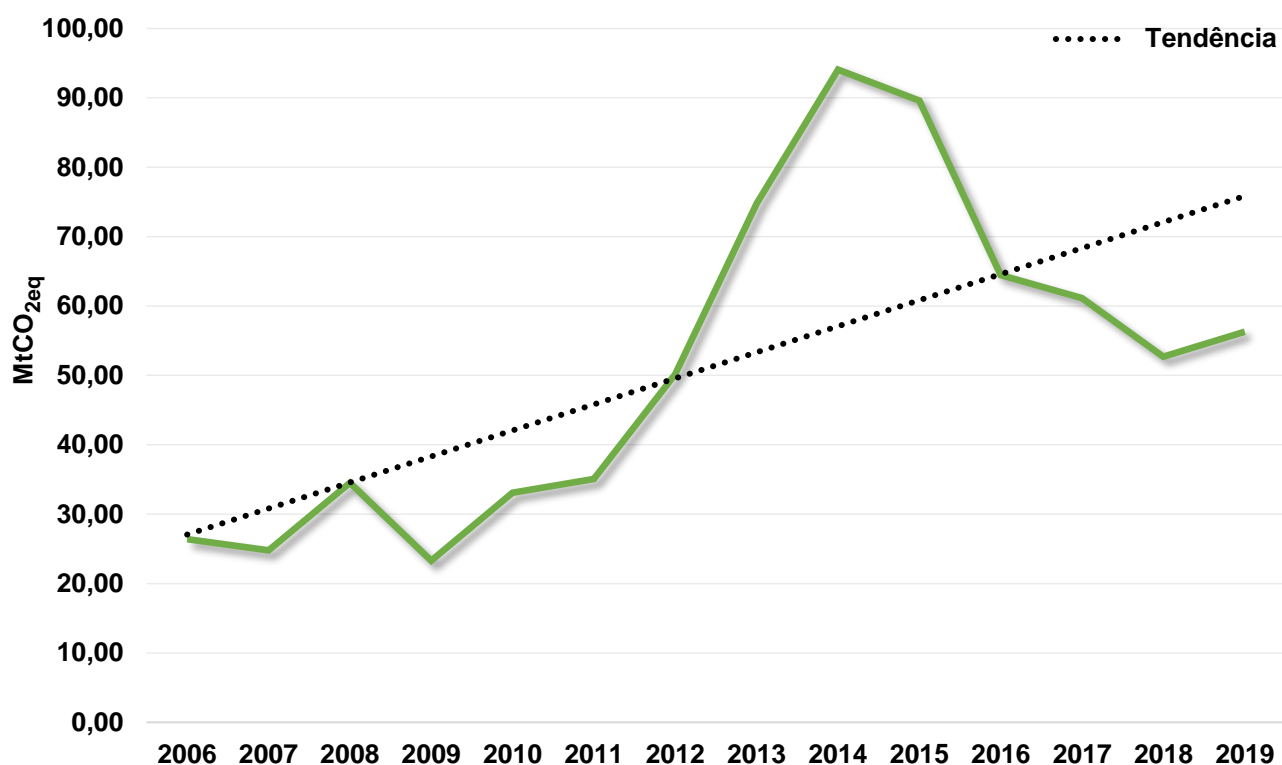


Figura 23 - Emissões de GEE do Setor Elétrico (Fonte: EPE, 2020)

Nesse contexto, a geração nucleoeletrica apresenta-se como ponto estratégico, uma vez que além da vantagem competitiva da geração nucleoeletrica para a geração de energia base em relação as outras fontes térmicas, sua principal diferenciação é o fato das usinas term nucleares virtualmente não emitirem GEE. Contudo, ao se analisar todo o processo de mineração e industrialização do urânio até o processo de geração de energia elétrica, é possível perceber a emissão de GEE.

Entretanto, de acordo com o estudo realizado pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), “Climate Change And Role of Nuclear Power 2020”, mesmo considerando todo o ciclo do combustível nuclear, ainda sim a geração nucleoeletrica se mantém como a fonte primária de menor emissão de GEE. A Figura 24 apresenta um comparativo entre as fontes de energia e suas respectivas taxa de emissão de CO<sub>2eq</sub>/KWh.

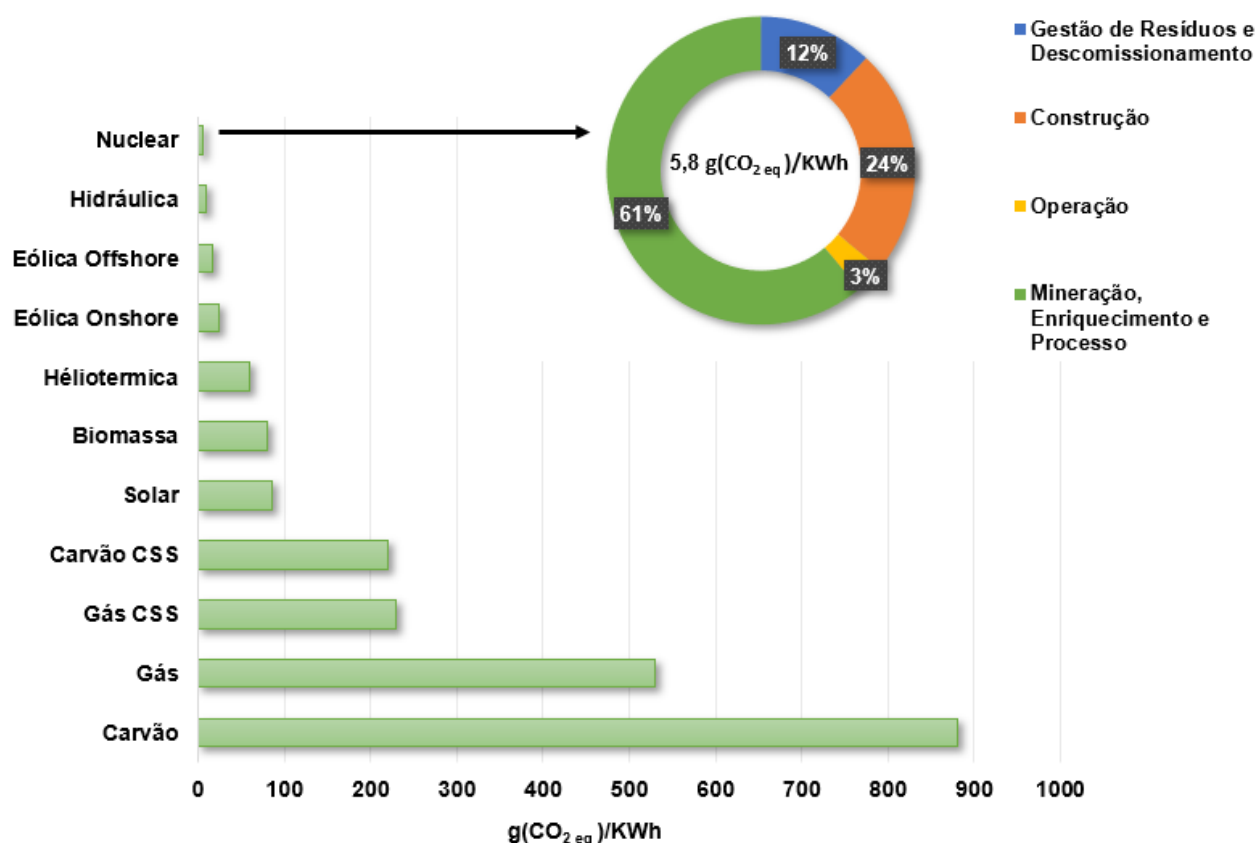


Figura 24 - Quantidade de CO<sub>2</sub>eq/ KWh de cada fonte primária (Fonte: IAEA, 2020)

Através da análise da Figura 24 é possível perceber que dentre as fontes de energia apresentadas, a nucleoeletrica é a que emite menos GEE por KWh, e que dentre essa emissão cerca de 61% é devido às atividades do ciclo do combustível nuclear.

Para se ter uma noção, em 2018, as usinas nucleares de Angra 1 e Angra 2 geraram o equivalente a 15,7 GWh, deixando de emitir uma média de 7,7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq na atmosfera<sup>17</sup>, caso este montante de energia fosse gerado por outra fonte térmica.

Os dados apresentados indicam a relevância da energia nuclear para a minimização das emissões de GEE pelo Sistema Elétrico Brasileiro, em especial quando compara-se com outras fontes térmicas, contribuindo assim para que o país alcance seu compromisso com as metas estabelecidas no Acordo de Paris.

<sup>17</sup> Valores obtidos a partir dos dados do Anuário Estatístico 2020 da EPE

### 3.3. Geração termonuclear no Brasil e no Mundo

Em 2019, 443 reatores nucleares estavam em plena operação no mundo, gerando aproximadamente 2586,2 TWh, uma parcela de 10% da energia elétrica gerada no mundo neste mesmo ano. A participação da geração termonuclear tem ainda uma maior relevância dentro de algumas das matrizes elétricas dos países detentores da Tecnologia Nuclear, como apresenta a figura 25, a geração termonuclear é essencial para países que não possui uma diversidade disponível de recursos para geração elétrica.

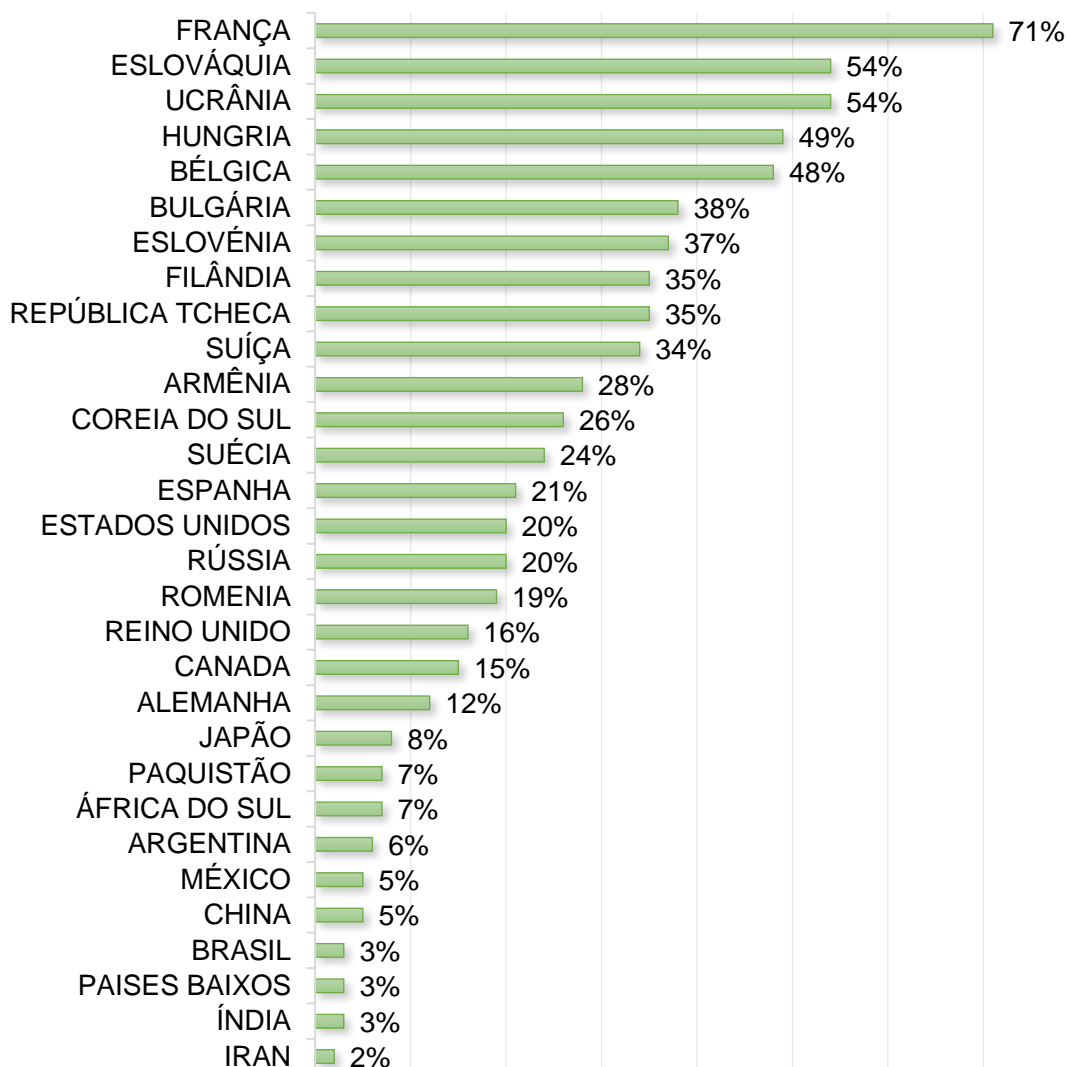


Figura 25 - Participação da geração nucleoeletrica nas matrizes dos países detentores da tecnologia nuclear (Fonte: IAEA, 2020)

O início da geração termonuclear se deu em meados de 1950, onde os primeiros reatores começaram a entrar em operação e atingiu seu primeiro pico em 1974 com 154 reatores em operação e uma capacidade instalada de 61 GW.

Na segunda metade dos anos 1970, seguiu-se uma queda, que levou a primeiro “vale” da capacidade instalada, com apenas 6 GW de implementação da capacidade instalada, devido ao primeiro grande acidente em uma usina nuclear, o acidente de Three Mile Island.

O impacto da crise do petróleo e a dependência deste recurso para a geração de eletricidade, fez com que diversos países aumentassem o investimento na construção de novos reatores, a exemplo da França que fez da energia nuclear sua principal fonte de energia, e em 1985 houve uma máxima histórica da expansão da geração nucleoeétrica, com 363 reatores em operação e uma capacidade instalada de 246 GW, em 1986 o segundo grande acidente em uma usina nuclear acontece, o acidente de Chernobyl, e um amplo movimento social antinuclear fez forte oposição em diversos países, reduzindo tanto o número de novos reatores quanto a expansão da capacidade instalada em comparação com os valores das décadas passadas.

Embora a diminuição do aumento líquido do número de reatores e da capacidade instalada, as usinas termonucleares que estão em operação aumentaram seu desempenho de produção de eletricidade.

Segundo dados coletados do final de dezembro de 2019 pela Agência internacional de energia atômica (IAEA, na sigla em inglês), atualmente 443 reatores nucleares estão em operação no mundo, em 30 países, com capacidade instalada total de 392,1 GW, desde 2011 a capacidade instalada vem mostrando um gradual crescimento, algo em torno de 23,2 GW, porém em 2019 o Japão decidiu desligar permanentemente 5 reatores que não geravam eletricidade desde o acidente de Fukushima em 2011, por causa desta decisão houve uma retração da capacidade instalada de 2019 em relação a 2018.

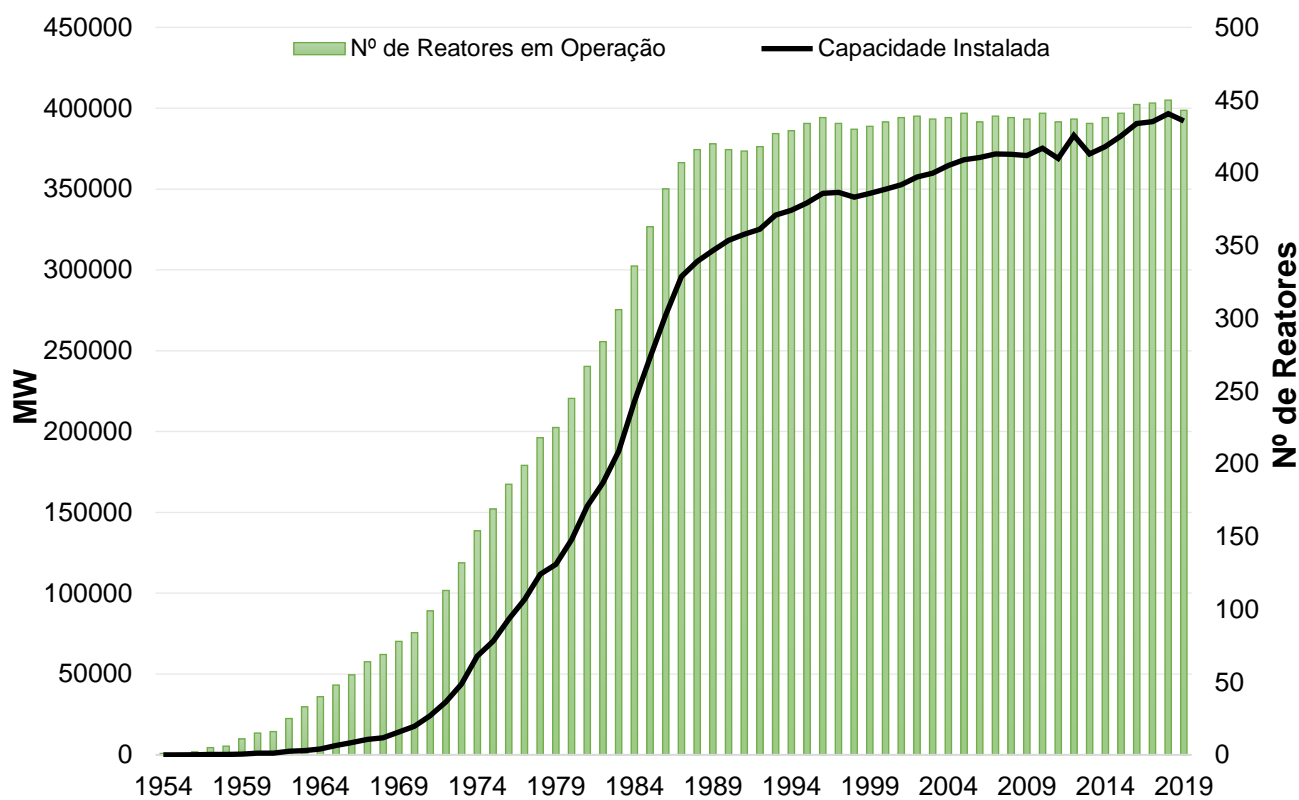


Figura 26 - Número de Reatores em Operação x Carga Instalada (Fonte: IAEA, 2020)

Em relação à continuidade da expansão nuclear, 54 novos reatores estão em fase de construção em 19 países com um total de capacidade de 57,4 GW, a capacidade instalada da geração termonuclear se manteve estável nos últimos anos, exceto no continente asiático que apresentou um aumento expressivo e foi responsável pelo surgimento da maioria dos novos reatores no mundo, de 2005 até 2019 foram conectados 61 novos reatores, 55 GW de capacidade instalada, no sistema elétrico asiático.

Outros cinco reatores do tipo PWR entraram em operação no final de 2019, dois na China (Zhangzhou (1126 MW) e Taipingling (1116 MW)), um no Irã (Bushehr (974 MW)), um na Rússia (Kursk (1175 MW)) e um no Reino Unido (Hinkley Point (1630MW)) totalizando 70 novos reatores em 14 anos.

Entretanto treze reatores (10.2GW) foram permanentemente desligados no mesmo período, principalmente como consequência direta do acidente de Fukushima.

Alguns países optaram por reconsiderar a utilização da energia nuclear e outros planejam redirecionar as suas respectivas matrizes energéticas de forma a abandonar a utilização da geração termonuclear.

O caso da Alemanha foi um dos mais significativos dentre aqueles que optaram por abandonar a utilização da geração termonuclear. O governo alemão, como resposta ao acidente de Fukushima fechou ao longo do ano de 2011 um total de 8 usinas nucleares, correspondente a 8.821 MW de capacidade instalada, e, programou o desligamento escalonado das demais 9 usinas em operação no país até 2022.

Na França, onde existe a participação expressiva da Tecnologia Nuclear na produção de eletricidade, o governo estabeleceu como meta reduzir a participação da energia nuclear de 75% para 50% no horizonte de 2025 (SANTOS, 2014; SCHNEIDER; FROGGATT, 2014)

Apesar das consequências do acidente nuclear de Fukushima para a indústria nuclear mundial, a utilização da Tecnologia Nuclear continua sendo considerada como uma opção energética adequada para a composição da matriz elétrica em diversos países, visto a necessidade da redução dos gases de efeito estufa e a crescente necessidade por energia elétrica.

Enquanto que no Brasil a procura da tecnologia nuclear começou na década de 1950, com o Almirante Álvaro Alberto, que importou duas ultracentrifugadoras da Alemanha para a iniciação do processo de enriquecimento do urânio, porém a decisão da implementação de uma usina termonuclear no Brasil aconteceu em 1969, quando foi delegada a Furnas Centrais Elétricas SA a incumbência de construir a primeira usina nuclear.

Em junho de 1974, enquanto as obras civis da Usina Nuclear de Angra 1 estavam em andamento, o Governo Federal decidiu ampliar o projeto, autorizando a Furnas construir a segunda usina, mais tarde, no dia 27 de junho de 1975, com a justificativa de que o Brasil já apontava escassez de energia elétrica para meados dos anos 90 e início do século 21, foi assinado na cidade alemã de Bonn o Acordo de Cooperação Nuclear, pelo qual contemplava a transferência da tecnologia nuclear, adquirida da Siemens/KWU, necessária ao seu desenvolvimento brasileiro nesse setor. Desta maneira, o Brasil deu um passo definitivo para o ingresso no clube de potências nucleares dando início à era nuclear Brasileira.

A produção de eletricidade no Brasil a partir da energia nuclear está limitada as Usinas de Angra 1 e Angra 2. A Usina de Angra 1, com capacidade de 640 MW e de projeto Westinghouse, teve o início de sua operação comercial em 1985 e apresentou durante certo período performance deficiente em função de diversos problemas

técnicos que foram devidamente solucionados. A Usina de Angra 2, com capacidade de 1.350 MW e projeto Siemens/KWU, teve sua operação comercial iniciada em 2001 e desde então tem tido performance compatível com as melhores usinas em operação no mundo. Angra 3 de 1,350 MW e projeto também da Siemens/KWU, apesar de iniciado sua construção em 1976 ainda não está em operação devido à atrasos nas obras e prazos significativamente influenciados por questões políticas, econômicas e associadas ao processo de licenciamento do empreendimento.

Com relação da expansão futura da geração termonuclear no Brasil, além do início da operação de Angra 3 previsto para 2026, de acordo com o PDE 2029, não há ainda uma previsão oficial para construção de novas usinas nucleares.

### **3.4. Controle e supervisão da proliferação do uso militar da energia nuclear**

A tecnologia nuclear é intrinsecamente dual, podendo ser utilizada para fins pacíficos ou militares. Hoje, são crescentes as preocupações com a proliferação de armamentos nucleares que pode ocorrer se um grande número de reatores nucleares for construído em países considerados geopoliticamente problemáticos.

Na medida em que mais países adquirem a capacidade de enriquecer urânio, eles se tornam potencialmente proliferadores de armas nucleares e o fato da possibilidade de utilizar o combustível nuclear para fabricação de armas é um problema real, e com a ideia de uma renascença da energia nuclear as preocupações com a proliferação de armas em todo o mundo aumentam.

A confirmação destas preocupações está no fato histórico que entre as décadas de 1950 e 1960, Reino Unido, França e China conseguiram desenvolver suas próprias armas, comprovando que a tecnologia nuclear pode ser estabelecida por meios domésticos. Isso levou a esforços para conter a proliferação horizontal de armas a outras nações, além da escalada nos estoques de armas, a chamada proliferação vertical, como também para banir os testes de explosões nucleares a céu aberto. Como tratativa destes problemas, a principal ação tomada pelo Conselho de Segurança das Nações Unidas foi a criação do Tratado de Não Proliferação (TNP), adotado em 1968, que dividiu os países em duas categorias: os que tinham produzido e detonado artefatos nucleares antes de janeiro de 1967 sendo eles, Estados Unidos, URSS, Reino Unido, França e China, e os demais, que não teriam acesso a essas

armas em troca de participar do intercâmbio de equipamentos, materiais e informações tecnológica e científicas para o inalienável uso pacífico da energia atômica, o TNP incumbiu à IAEA a tarefa de estabelecer salvaguardas e efetuar verificações entre os signatários do acordo.

Países como Índia, Paquistão, Israel, Brasil e Argentina optaram por manter suas opções abertas e decidiram não assinar o TNP em primeiro momento, os três primeiros países conseguiram desenvolver suas armas, já o Brasil e Argentina que também ingressaram em programas que poderiam ter levado a armas nucleares, mas abandonaram os seus respectivos programas e em 1991 assinaram o Acordo Bilateral para o Uso Exclusivamente Pacífico da Energia Nuclear em Guadalajara, com este acordo foi criado a Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC), para aplicar e administrar o Sistema Comum de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (SCCC) e em dezembro do mesmo ano foi assinado o Acordo Quadripartite entre a Argentina, Brasil, ABACC e a AIEA que colocou os programas de ambos os países sob um sistema duplo de salvaguardas, aplicado pela AIEA e pela ABACC.

Em 1998 o Brasil tornou-se signatário do TNP, porém, recusou assinar o protocolo adicional que autoriza a agência a inspecionar locais “sensíveis” com o tempo de aviso prévio pequeno. O governo brasileiro não quer permitir acesso irrestrito dos técnicos da AIEA ao equipamento de ultracentrifugação da fábrica de enriquecimento de urânio, o Brasil alega que além de colocar em sua Constituição que o uso da energia nuclear seria somente para fins pacíficos, o trabalho dos inspetores da AIEA é o de evitar que materiais nucleares sejam desviados para aplicações não declaradas, sendo, portanto, um trabalho de verificação de contabilidade de materiais. Sendo assim, precisam registrar e ter acesso aos registros de entrada e saída do material que está sendo processado, mas não há necessidade de visualizar as centrífugas que executam o processo.

Um dos princípios básicos de proteção ao conhecimento é o de só permitir acesso à informação àquelas pessoas que necessitem delas para trabalhar. Para países onde a indústria nuclear é privada existem, no Protocolo, proteções a direitos constitucionais da indústria privada envolvendo, por exemplo, seus segredos tecnológicos. Nesse caso o País em questão compromete-se a fazer tudo que for razoável para satisfazer a AIEA por outros meios, entretanto o Brasil não estaria

protegido por essas cláusulas porque a indústria é estatal e, em princípio, a AIEA teria poderes para ordenar o acesso a locais “sensíveis”.

O protocolo adicional já está em vigor em 39 países e já foi assinado por outros 47. Dos países onde está em vigor os relevantes, em termos nucleares, são Japão e Canadá, enquanto os países da União Europeia assinaram, juntamente com a EURATOM<sup>18</sup>, o Protocolo Adicional cuja entrada em vigor só se dará quando todos os países o ratificarem.

Portanto apesar do Brasil não ceder o seu direito de resguardar os segredos industriais sobre tecnologia de ultracentrifugação que desenvolveu, mantém total transparência do programa nuclear brasileiro com as agências fiscalizadoras afirmando o seu compromisso com os diversos tratados ratificados, além de que os métodos empregados até hoje, foram suficientes para evitar a proliferação nos últimos anos.

### **3.5. Potencial energético do urânio brasileiro**

O Brasil possui atualmente a sexta maior reserva mundial de urânio, de acordo com a INB, são 309 mil toneladas identificadas em 25% do território nacional, sem considerar as reservas estimadas na região amazônica que somam mais 150 mil toneladas, elevando o Brasil a terceira maior reserva do mundo, as jazidas descobertas estão localizadas nas regiões conforme mostrado na figura 27.

---

<sup>18</sup> A Comunidade Europeia da Energia Atômica (EURATOM) é uma organização com estatuto legal próprio, à parte da União Europeia mas governada pelos seus Estados-membros com o objetivo à utilização pacífica da energia nuclear.



Depósitos	Medidas Indicadas (t)	Inferidas (t)	Total (t)
Caetité / Lagoa Real	94000	6.700	100.770
Santa Quitéria	92.200	51.300	142.500
Outros	39.500	26.600	66.100
Total	224.700	84.670	309.370
Prognóstico: Pitinga		150.000	

Figura 27 - Reservas de urânio descoberta em território nacional (Fonte: INB, 2020)

Além de possuir umas das maiores reservas de urânio, o Brasil também detém o domínio sobre a tecnologia de enriquecimento de urânio e de todo o ciclo do combustível, no que concerne ao enriquecimento de urânio, a tecnologia brasileira é uma das mais competitivas do mundo, fruto das pesquisas do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), contém elementos de projeto inovadores como a levitação magnética, onde o eixo central da máquina não gira em torno de um eixo mecânico, mas de um eixo imantado, reduzindo o atrito entre as peças e aumentando o tempo de vida útil da máquina, além de reduzir o consumo de energia para o enriquecimento, este processo mostrou ser mais eficiente e barato do que o processo de difusão gasosa, utilizada em outros países como Estados Unidos e França.

Quando se trata de potencial energético, é essencial considerar a quantidade de energia que uma fonte consegue produzir por uma determinada quantidade de sua massa. A fissão nuclear por se tratar de uma reação que ocorre no núcleo, onde se encontra 99% da massa de um átomo, é de se esperar que a energia produzida por essa reação seja muito superior a energia produzida por uma reação que ocorra nos elétrons que orbitam este núcleo como no caso das reações químicas. A tabela 4 abaixo, apresenta a diferença de densidade energética entre diversas fontes de combustível e suas respectivas comparações com a densidade energética do petróleo.

Tabela 4 - Densidade energética de fontes combustíveis

<b>Tipo de Combustível</b>	<b>Densidade Energética (KWh / Kg)</b>	<b>Nº de vezes mais denso do que o petróleo</b>
Fissão Nuclear (U-235 100% enriquecido)	24.513.889	2.715.385
Urânio Natural (99,3% U-238; 0,7% U-235) em um reator regenerador rápido	6.666.667	738.462
Urânio Enriquecido (3,5% U-235) em um reator de água leve	960.000	106.338
Urânio Natural (99,3% U-238; 0,7% U-235) em um reator de água leve	123.056	13.631
Propano LPG	13,8	1,5
Butano LPG	13,6	1,5
Gasolina	13	1,4
Combustível diesel / Óleo para aquecimento residencial	12,7	1,4
Biodiesel	11,7	1,3
Carvão	9,0	1,0
Água a uma altura de represa de 100m	0,0003	N/A

Fonte: Veiga, 2011

Considerando a grande densidade energética que o urânio possui em comparação com outras fontes térmicas associado com a abundância do mineral em território nacional, conseguimos dimensionar o grande potencial na geração de termonuclear nacional.

De acordo com Veiga (2011) as atuais reservas comprovadas do Brasil equivalem a 238 anos de operação do gasoduto Bolívia-Brasil (25 milhões de metros cúbicos por dia) ou então a 46 anos de abastecimento da Europa com o gás da Rússia ( 130 milhões de metros cúbicos por dia), considerando que todo o gás fosse utilizado para a geração de eletricidade, suficiente para suprir o abastecimento de 32 usinas similares a Angra 2 por toda sua vida útil se for considerado as futuras usinas de geração III, III+ ou IV o número de usinas é ainda maior e em termos de potencial energético as reservas nacionais equivalem 7 bilhões de barris de petróleo.

Verifica-se, portanto que as reservas brasileiras de urânio têm dimensões muito significativas e o Brasil na posse deste valiosíssimo recurso mineral energético,

associado ao domínio tecnológico do seu processamento tem total capacidade para o aumento de escala na geração nucleoe elétrica.

### 3.6. Viabilidade econômica

Os custos envolvidos na geração de energia elétrica podem ser classificados entre custos de investimento e custos de geração, de forma que os custos de investimento são associados à construção do empreendimento e os custos de geração decorrem da operação da usina e na produção de eletricidade.

Os custos de investimento incluem os estudos de viabilidade e o licenciamento ambiental, as obras civis, os equipamentos mecânicos, elétricos e controles, a montagem além do comissionamento da planta e a conexão elétrica à rede de transmissão. De maneira geral, cerca de dois terços do custo do empreendimento nuclear são representados pelos custos de investimentos, onde dependem da taxa de juros da dívida, da proporção da dívida e, do tempo considerado necessário para a recuperação do capital.

Gastos com equipamentos e mão de obra de montagem representam cerca de 50% do investimento. A outra metade dos custos referem-se aos custos relacionados à infraestrutura adicional necessária, como instalações de transmissão, torres de resfriamento, água necessária à operação da unidade, prédios administrativos, depósitos, estradas, equipamentos de transporte, gerenciamento do projeto, dispêndios com seu desenvolvimento, licenças e autorizações, impostos, recrutamento e treinamento a tabela 5 discrimina a divisão dos custos de investimento de um empreendimento nuclear.

Tabela 5 - Divisão de custos de um empreendimento nuclear

Item	% do investimento
Obras civis e instalação	28%
Equipamentos mecânicos e instalação	23%
Equipamentos elétricos e instalação	18%
Projetos indiretos	15%
Taxas e contingências	11%
Custo do proprietário	5%
<b>Custo total do projeto</b>	<b>100%</b>

Fonte: EPE, 2020

A avaliação da competitividade econômica da Tecnologia Nuclear para produção de eletricidade frente a outras opções energéticas é um assunto controverso e não há uma visão preponderante, em especial, em função do histórico de empreendimentos da Tecnologia Nuclear cujos os cronogramas foram significativamente atrasados em relação às expectativas iniciais de projeto e seus custos de investimento aumentaram significativamente. As usinas brasileiras de Angra 2 e Angra 3 são exemplos desta escalada do custo inicial de projeto, quando analisado o resultado econômico da construção de Angra 2 o resultado não é nada animador, orçado inicialmente em 2 bilhões, terminou custando cinco vezes mais que o valor previsto, enquanto Angra 3 de acordo com a Eletronuclear já foram alocados 5,3 bilhões de um total de 14,8 bilhões planejados até 2026, se for considerado que o projeto de Angra 3 é idêntico ao Angra II percebe-se que o valor já ultrapassou sete vezes o valor orçado. A justificativa econômica para a finalização da construção de Angra 3 é resumida pela Eletronuclear nos seguintes aspectos:

- O orçamento para a conclusão é compatível àqueles oriundos da implantação de usinas nucleares de mesmo porte no exterior.
- Recuperação econômica dos investimentos já realizados em dólar em Angra 3.
- Interrupção do processo de gastos anuais sem retorno, da ordem de 20 milhões de dólares, para a estocagem e conservação de equipamentos e outras despesas como seguros e estruturas.
- O uso futuro de combustível de baixo custo e que apresenta somente uma pequena parcela da sua composição em moeda estrangeira.
- O aumento na receita e ganho de escala da INB, permitindo a desoneração do Tesouro Nacional do custeio remanescente da INB.

De acordo com os dados levantados pela EPE, o custo médio de construção de usinas nucleares é de 5 mil dólares por quilowatt, duas vezes mais que o custo da construção de uma térmica à carvão e cerca de cinco vezes à GNL combinado, para efeito de comparação o preço da construção de usinas hidrelétricas no Brasil é aproximadamente mil dólares por quilowatt, a tabela 6 apresenta esta comparação de custos de investimento entre algumas fontes primárias.

Tabela 6 - Custo de investimento para construção de usinas elétricas

Fonte	Custo de Investimento (US\$/KW)
Nuclear	5.000,00
Carvão	2.500,00
Biomassa - Residual lenhosa	1.800,00
Biomassa - Cavaco	1.500,00
Biomassa - Bagaço de cana	1.200,00
GNL combinado	1.000,00
Hidrelétrica	1.000,00
GNL simples	800,00

Fonte: EPE, 2020

Além do alto custo de investimento, os custos de descomissionamento das centrais nucleares são de responsabilidade do operador ou do proprietário da planta e o não cumprimento ou a simples prorrogação de uma fase específica pode representar um aumento dos custos totais de descomissionamento, principalmente em função da expansão dos custos com armazenagem e vigilância.

O Nuclear Energy Agency (NEA, 2020) procurou estimar os custos de descomissionamento dos principais tipos de reatores e para as usinas do tipo PWR os resultados foram entre US\$ 200/kW e US\$ 500/kW e o estudo conclui que o custo de descomissionamento de uma usina nuclear não está diretamente relacionado a capacidade instalada da planta, ou seja, os custos fixos, como segurança, proteção, gestão de projetos e gestão de rejeitos, são relativamente mais elevados para plantas de pequeno e médio porte.

Portanto ao observar a viabilidade econômica das usinas nucleares nos deparamos com duas barreiras, a primeira é o alto custo de investimento inicial juntamente com a incerteza de escalada nos valores por atrasos na implantação das usinas, a segunda barreira é o valor adicional que os empreendimentos nucleares necessitam ter para seu descomissionamento, ocasionando uma significativa desvantagem competitiva em relação a outras fontes de energia primaria, necessitando de subsídios para a sua implantação.

### 3.7. Opinião e aceitação pública

Historicamente a tecnologia nuclear tem dificuldades em suas relações públicas, ocasionando a criação de diversos mitos e falácias em torno desta tecnologia, sendo assim, tem na opinião pública uma importante restrição à sua utilização e expansão, necessitando superar esta dificuldade para que possa aumentar a sua participação de geração no parque elétrico em detrimento de outras usinas térmicas.

A aceitação pública é avaliada através de pesquisas de opinião, onde geram evidências confiáveis quanto à opinião da população quanto a um determinado tema. Em geral observa-se que a opinião pública é fortemente influenciada pelo nível de informação e conhecimento da sociedade em relação à tecnologia nuclear, sendo que quanto maior o nível de informação e conhecimento da população sobre a energia nuclear maior suporte ela fornecerá a utilização da mesma.

Em 2009, alunos da Universidade Federal de Lavras (UFLA) assistiram a um minicurso sobre aplicações da energia nuclear, onde foi realizado uma pesquisa antes e depois do mesmo, considerando os aspectos positivos e negativos do tema proposto. Os resultados da pesquisa realizada antes do minicurso mostraram que os temas associados à energia nuclear foram as usinas nucleares, armas atômicas, rejeitos radioativos e o acidente de Chernobyl e após o minicurso, os resultados de uma nova pesquisa indicaram, que os temas assinalados pelos estudantes foram a conservação de alimentos, medicina, energia elétrica e saúde. Antes da palestra, a percepção geral dos estudantes sobre o tema tecnologia nuclear era majoritariamente negativa, 59,3% e após o evento esse número caiu para 12,9%. (FERREIRA; SOARES, 2012).

Portanto a constatação da prevalência da desinformação da população quanto ao tema, juntamente com a redução da resistência quando a sociedade está devidamente informada sobre o uso da energia nuclear, indica um dos desafios a serem superados pela indústria no sentido de assegurar um devido nível de informação com a necessária credibilidade, e assim garantir a confiança da opinião pública. Em busca de suprir essa lacuna no Brasil, profissionais e organizações da área vêm intensificando suas ações de divulgação de informações e benefícios sociais da energia nuclear.

### 3.8. Gerenciamento e Armazenamento de resíduos

A geração nucleoeleétrica é a única opção tecnológica de produção de eletricidade em grande escala que tem completa responsabilidade sobre todos os seus rejeitos e assume integralmente os custos da sua gestão. Os custos dos rejeitos gerados em todas as etapas do ciclo do combustível são internalizados e pagos pelos consumidores na tarifa de eletricidade.

Em cada etapa do ciclo do combustível, existem tecnologias comprovadas para o gerenciamento seguro dos rejeitos radioativos. O objetivo principal da gestão e disposição de rejeitos radioativos é proteger as pessoas e o meio ambiente, isso significa isolar ou diluir os rejeitos, de modo a tornar inofensiva a taxa ou concentração de qualquer radionuclídeo<sup>19</sup> que volte para a biosfera. Para conseguir isso, praticamente todos os rejeitos são contidos, segregados e controlados.

A grande maioria dos rejeitos continuam em depósitos temporários, e a disposição final e permanente ainda é objeto de planejamento. No Brasil a disposição intermediária e final desses rejeitos são de responsabilidades da CNEN, cujo estudos para o projeto definitivo desses rejeitos se encontram em andamento com levantamentos preliminares já realizados por empresas com experiência internacional.

Até o presente momento cada unidade fabril do ciclo do combustível mantém um depósito temporário para o gerenciamento dos rejeitos, no caso das usinas Angra 1 e 2 os elementos irradiados retirados dos reatores são depositados em piscinas de água borada até que reduzam sua temperatura e radioatividade para então serem transferidos, para o depósito final ou então para o reprocessamento do combustível.

Em 2015 a Eletronuclear optou pela construção da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustível Irradiado (UAS) de Angra 1 e 2, que atenderá como repositório seguinte dos elementos combustíveis armazenados nas piscinas, porém a transferência dos elementos para o depósito à seco foi adiado mediante a uma decisão civil pública movida pelo MPF no qual questiona a regularidade das licenças ambientais obtidas para a construção do novo depósito. O repositório final de responsabilidade da CNEN até o presente momento, não foi construído e o projeto se encontra na fase de definição de local para sua instalação.

---

<sup>19</sup> Radionuclídeos são isótopos instáveis, ou seja, sujeitos ao processo de decaimento radioativo.

As novas gerações de reatores nucleares, entre eles os reatores rápidos e os reatores incineradores de rejeitos, visam reduzir o volume de rejeitos destinados a depósitos finais, estes modelos de reatores utilizam elementos como o plutônio e amerício que estão presentes nos elementos combustível irradiados dos reatores das centrais nucleares atualmente em funcionamento, com a reutilização do combustível o volume final de rejeitos e a escala de gerenciamento de tempo reduzirá para uma escala comparável aos tempos médios de degradação de vários materiais presentes em rejeitos industriais e energéticos comuns, até que atinjam seu estado natural.

#### 4. CONCLUSÃO

A necessidade do aumento de geração elétrica no Brasil é fundamental para viabilizar o crescimento econômico necessário ao desenvolvimento do país, além da consequente melhoria da qualidade de vida da população brasileira.

Em consequência das restrições socioambientais de construção de novos grandes reservatórios de regularização plurianual, a expansão da oferta de energia por hidroelétricas será por meio de usinas a fio d'água, aumentando a sazonalidade desta fonte e reduzindo progressivamente a capacidade de regularização das usinas hidrelétricas no SIN, conseqüentemente haverá aumento da utilização de usinas térmicas inflexíveis para a geração na base do sistema para a garantia da segurança energética do país.

A opção nuclear se apresenta neste cenário como alternativa para suprir esta demanda energética futura, apresentando uma vantagem competitiva para a geração na modalidade inflexível, por conseguir gerar grandes blocos de energia com uma variação de custo muito baixo, possuir abundância do minério de urânio em território nacional e dominar a tecnologia necessária para a criação dos elementos combustíveis, além do fato de virtualmente não emitir gases de efeito estufa, contribuindo para que o Brasil mantenha sua matriz elétrica sustentável.

Entretanto os empreendimentos nucleares no Brasil possuem um histórico de elevados custos de investimento inicial para a sua implantação, além de atrasos em suas construções quando comparado às outras opções de fontes térmicas, necessitando de subsídios governamentais para sua implantação, outra barreira para expansão da geração nuclear no Brasil está associado a percepção e opinião pública a respeito desta tecnologia, que influencia o posicionamento dos tomadores de decisões a respeito desta opção energética.

Portanto o melhor caminho para viabilizar a geração nuclear como uma alternativa de suprir a geração de energia de base para a matriz elétrica em resposta às demandas futuras é a redução do custo de investimento inicial para empreendimentos nucleares, através da simplificação e padronização de projetos, priorização de utilização de equipamentos passivos e reatores modulares, assim como a construção de parques geradores para o aproveitamento da mesma infraestrutura o que possibilitará uma maior atratividade econômica da opção nuclear, no que

concerne a percepção e opinião pública, é necessário a ampliação de programas com a necessária credibilidade para a divulgação de informações e benefícios sociais da energia nuclear, além da definição do armazenamento definitivo dos resíduos radioativos que contribuirá significativamente por uma maior aceitação da energia nuclear pela sociedade, possibilitando que o Brasil se beneficie com as vantagens da geração termonuclear, assegurando assim o desenvolvimento sustentável do país.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAM, T.; ION, S. Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. **Energy Policy**, v. 36, p. 4323–4330, 1 dez. 2008.
- ALMEIDA, R. A. D. **Um estudo simplificado sobre a percepção pública na área nuclear: sugestões para campanhas educativas para os diferentes segmentos da sociedade**. p. 85, 2011.
- ANEEL. **Agência Nacional De Energia Elétrica**. Entidades Setoriais. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 24 ago. 2020.
- CARVALHO, J. F. DE. O espaço da energia nuclear no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 293–308, 2012b.
- CARVALHO, J. F. DE. The role of nuclear energy in Brazil. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 293–308, 2012a.
- CCEE. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**. Entidades Setoriais. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos)>. Acesso em: 10 out. 2020.
- CMSE. **CMSE: capacidade instalada de usinas hidrelétricas ultrapassa 100 GW - Todas as Notícias - Ministério de Minas e Energia**. . Acesso em: 29 out. 2020.
- CNEN. GLOSSÁRIO DO SETOR NUCLEAR E RADIOLÓGICO BRASILEIRO. p. 53, 2020a.
- CNEN. **A Energia Nuclear e o Planejamento Energético**, 2020b. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/Aenergianucleareoplanejamentoenergico.pdf>>
- CORRÊA, P. V. et al. **Análise da experiência internacional na contratação de termoeletricas: contribuições para o caso brasileiro**. Rio de Janeiro, 2017.
- COSTA, D. R. Produção de pastilhas cerâmicas combustíveis de UO<sub>2</sub> dopadas para aplicação nuclear /. jun. 2018.
- DANTAS, G. Considerações sobre a Expansão do Parque Gerador Brasileiro e sobre o critério de Seleção de Projetos nos Leilões. **Considerações sobre a Expansão do Parque Gerador Brasileiro e sobre o critério de Seleção de Projetos nos Leilões**, p. 49, 2016.
- DE OLIVEIRA, D. L. Avaliação de Projeto de Cogeração a partir de Biomassa Florestal: Uma Abordagem pela Teoria de Opções Reais. 2 abr. 2012.
- DE RUIZ, R. H. **AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ECONÔMICA E ENERGÉTICA DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA ATRAVÉS DE MÚLTIPLOS CRITÉRIOS**. [s.l.] UFRJ, 2017.
- EIA. Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050. p. 74, 2018.

EIA. Capital Costs and Performance Characteristics for Utility Scale Power Generating Technologies. **Capital Costs and Performance Characteristics for Utility Scale Power Generating Technologies**, p. 212, 2019.

ELETRONUCLEAR, E. **Eletronuclear**. Entidades Setoriais. Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Paginas/default.aspx>>.

ELETRONUCLEAR, E. **CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO**. Disponível em: <[http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01\\_02\\_caracterizacao.html](http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01_02_caracterizacao.html)>. Acesso em: 12 set. 2020b.

FALCETTA, F. A. M. **Evolução da capacidade de regularização do sistema hidrelétrico brasileiro**. Mestrado em Engenharia Hidráulica—São Paulo: Universidade de São Paulo, 7 jun. 2016.

FERREIRA, V. V. M. et al. Rejeitos radioativos de baixo e médio nível: levantamento da variação de volume Armazenado e disposto. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 24, p. 27–36, 30 jun. 2012.

FERREIRA, V. V. M.; SOARES, W. A. Insucessos em empreendimentos nucleares devido a falhas em processos de Comunicação Pública. **Intercom: Revista Brasileira de Ciências da Comunicação**, v. 35, n. 2, p. 313–329, dez. 2012.

**Financing Nuclear Energy - World Nuclear Association**. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/financing-nuclear-energy.aspx>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

FREITAS, C. C. P. E E. C. DE. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico - 2ª Edição**. [s.l.] Editora Feevale, 2013.

GALBIATTI-SILVEIRA, P.; GALBIATTI-SILVEIRA, P. Energy and climate changes: the social and environmental impacts of the hydroelectric and the diversification of the Brazilian energy source. **Opinião Jurídica**, v. 17, n. 33, p. 123–147, jun. 2018.

GLASSTONE, S.; SESONSKE, A. **Nuclear Reactor Engineering: Reactor Systems Engineering**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2012.

GOLDBERG, S. M.; ROSNER, R. Nuclear Reactors: Generation to Generation. **Nuclear Reactors**, p. 40, 2011.

GOLDEMBERG, J. Energia nuclear para o Brasil: opção ou necessidade? p. 24, [s.d.].

GONÇALVES, J. DA S. **Tomada de decisão com informação do risco no contexto do licenciamento de uma unidade de conversão de hexafluoreto de urânio**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

IAEA. **Nuclear Power Reactors in the World**. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2020.

IEA. **Brazil - Countries & Regions**. Disponível em: <<https://www.iea.org/countries/brazil>>. Acesso em: 29 out. 2020b.

IEA. **IEA Energy Atlas**. Disponível em: <<http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-1118783123/0>>. Acesso em: 29 out. 2020a.

INB. **Indústrias Nucleares do Brasil**. Entidades Setoriais. Disponível em: <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear>>. Acesso em: 7 set. 2020b.

INB. **Indústrias Nucleares do Brasil**, 2020a.

KONIGAME, V. C.; CONTI, T. DAS N. ESTUDO DO REATOR NUCLEAR DE 4ª GERAÇÃO “VERY HIGH TEMPERATURE REACTOR” – VHTR. **Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada - UNG-Ser**, v. 1, n. 1, p. 47–68, 26 dez. 2017.

LAMARSH, J. R.; BARATTA, A. J. **Introduction to Nuclear Engineering: Pearson New International Edition**. [s.l.] Pearson Education Limited, 2013.

LAWSON, A.; PEREIRA, G. **TERMELÉTRICAS E SEU PAPEL NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**, 2017. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/20398/Coluna%20Opinio%20Fevereiro%20-%20Termeletricas%20-%20Andre%20e%20Guilherme.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>

LIMA, D. L. M. **O desastre de Fukushima: nas linhas (e entrelinhas) da controvérsia nuclear**. [s.l.] UFRJ, 2014.

MACEDO-SOARES, T. D. L. V A.; FIGUEIRA, L. A. P. A. Gestão estratégica da energia nucleoeleétrica no Brasil: recursos e competências críticos para seu sucesso. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 11, n. SPE1, p. 55–76, 2007.

MARQUES, P. Os deletérios impactos da crise nuclear no Japão. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 309–312, 2012.

MATSUMURA, E. H.; FERREIRA, T. V. B. COORDENAÇÃO EXECUTIVA. p. 127, [s.d.].

MAYON, P.; PARODI, M. **Setor elétrico brasileiro 2012-2018: Resiliência ou Transição?** [s.l.] Synergia, [s.d.].

MMA. **Acordo de Paris**. Entidades Setoriais. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

NAVEIRO, A. P.; MAÇAIRA, P. M.; OLIVEIRA, F. L. C. Energia Natural Afluentes por subsistema do Brasil: uma análise de representatividade da Média de Longo Termo (MLT). p. 11, [s.d.].

NEA. **The Full Costs of Electricity Provision**. Disponível em: <[https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_14998/the-full-costs-of-electricity-provision?details=true](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_14998/the-full-costs-of-electricity-provision?details=true)>. Acesso em: 19 nov. 2020.

OLIVEIRA, A. M. D. **Estratégia ótima de oferta de preços no mercado de curto prazo em sistemas com predominância hidrelétrica**.

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Entidades Setoriais. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 24 ago. 2020a.

ONS, P. **ONS - PROGRAMA MENSAL DA OPERAÇÃO**. Entidades Setoriais. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Informe%20do%20PMO%20-%20NOV%20RV2.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2020b.

PALOMINO, J. M. G. **Formação de preço de energia elétrica gerada por biomassa no Ambiente de Contratação Livre brasileiro: uma abordagem computacional baseada em agentes**. Mestrado em Economia Aplicada—Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 6 abr. 2009.

PASSAIA, O. A. et al. Impact of large reservoirs on simulated discharges of Brazilian rivers. **RBRH**, v. 25, 2020.

PDE 2029. **Plano Decenal de Expansão de Energia**, [s.d.].

PNE 2030. **Plano Nacional de Energia 2030**. [s.l.] Gráfica da Eletrobrás, 2007. v. 12

PNE 2050. **Plano Nacional de Energia - 2050**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 7 nov. 2020.

RESENHA ERNERGÉTICA BRASILEIRA. **Resenha Energética Brasileira**, 30 maio 2020.

SANTOS, R. L. P. DOS. **A energia nuclear no sistema elétrico brasileiro**. [s.l.] UFRJ, 2014.

SAPUNARU, R. A. et al. POR QUE DEVEMOS INVESTIR EM ENERGIA NUCLEAR? **Ciência e Natura**, v. 37, p. 02, 18 jun. 2015.

SARAIVA, G. J. DE P. **Energia Nuclear no Brasil: Fatores Internos e Pressões Externas**, ESCOLA SUPERIOR DE GUERRA CENTRO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2007. Disponível em: <<https://www.esg.br/publi/arquivos-cadernos/CEE008.pdf>>

SCHNEIDER, M.; FROGGATT, A. 2012–2013 world nuclear industry status report. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 70, n. 1, p. 70–84, jan. 2014.

SIPOT ELETROBRAS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro**. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>>. Acesso em: 29 out. 2020.

VEIGA, J. E. DA. **Energia nuclear: Do anátema ao diálogo**. [s.l.] Senac, 2011.

WILLS, J. G. **Nuclear Power Plant Technology**. [s.l.] Wiley, 1967.