



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

IAN DO NASCIMENTO FARIAS

THIAGO WANDERLEY CAVALCANTI PIRAJA VIANA FERREIRA

**A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL E A CONCLUSÃO DE ANGRA 3:  
SEGURANÇA, VIABILIDADE ECONÔMICA E ACEITAÇÃO SOCIAL**

Recife  
2025

Autor: \_\_\_\_\_

Ian do Nascimento Farias

Autor: \_\_\_\_\_

Thiago Wanderley Cavalcanti Piraja Viana Ferreira

**A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL E A CONCLUSÃO DE ANGRA 3:  
SEGURANÇA, VIABILIDADE ECONÔMICA E ACEITAÇÃO SOCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Texto  
Engenharia de Energia da Universidade  
Federal de Pernambuco, como requisito  
parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Jair de Lima Bezerra

Coorientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Mario Augusto Bezerra da Silva

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Farias, Ian do Nascimento.

A energia nuclear no Brasil e a conclusão de Angra 3: segurança, viabilidade econômica e aceitação social / Ian do Nascimento Farias, Thiago Wanderley Cavalcanti Piraja Viana Ferreira. - Recife, 2025.

70 p.

Orientador(a): Jair de Lima Bezerra

Coorientador(a): Mario Augusto Bezerra da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2025.

1. Energia nuclear. 2. Angra 3. 3. Política energética. 4. Viabilidade econômica. 5. Custo nivelado de energia (LCOE). 6. Aceitação pública. I. Ferreira, Thiago Wanderley Cavalcanti Piraja Viana. II. Bezerra, Jair de Lima. (Orientação). III. Silva, Mario Augusto Bezerra da. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

IAN DO NASCIMENTO FARIAS

THIAGO WANDERLEY CAVALCANTI PIRAJA VIANA FERREIRA

**A ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL E A CONCLUSÃO DE ANGRA 3:  
SEGURANÇA, VIABILIDADE ECONÔMICA E ACEITAÇÃO SOCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Texto  
Engenharia de Energia da Universidade  
Federal de Pernambuco, como requisito  
parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energia.

Aprovado em: 12/08/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexandre Carlos Araujo da Costa  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Daniel González Rodríguez  
Universidade Federal de Pernambuco

## RESUMO

O presente trabalho reforça a importância estratégica da energia nuclear como um dos pilares da segurança energética nacional, especialmente em um país de dimensões continentais como o Brasil, onde a demanda por eletricidade cresce de forma contínua e enfrenta desafios como crises hídricas e a dependência de fontes intermitentes. Ao analisar o caso da Usina de Angra 3, observou-se que a energia nuclear pode representar não apenas uma alternativa complementar na matriz elétrica, mas também um vetor para o desenvolvimento econômico, tecnológico e ambiental do país. A análise econômica baseada em indicadores clássicos de investimentos — como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) — evidenciou que a retomada do projeto é não apenas viável, mas vantajosa do ponto de vista financeiro. A incorporação do LCOE como métrica adicional reforçou a robustez da proposta, ao demonstrar um perfil tarifário estável e competitivo frente às demais fontes convencionais. Além disso, a conclusão de Angra 3 contribuiria para a redução das emissões de carbono, para o fortalecimento do parque nuclear brasileiro e para o avanço tecnológico em áreas como o ciclo do combustível e a engenharia de reatores. Contudo, a viabilidade técnica e econômica, por si só, não assegura a continuidade e o sucesso de projetos nucleares. A aceitação pública emerge como um fator determinante para a consolidação dessa fonte energética no Brasil. Fatores como o medo associado a acidentes históricos, a ausência de campanhas educativas, a baixa transparência institucional e os escândalos de corrupção impactam diretamente a percepção social, alimentando desconfiança e resistência. Enfrentar esse cenário requer políticas consistentes de comunicação pública, engajamento comunitário e valorização do conhecimento científico como instrumento de empoderamento social. A comparação com experiências internacionais, como as da Finlândia e da França, evidencia que é possível reverter cenários de desconfiança por meio de planejamento transparente, continuidade institucional e participação cidadã ativa. Ainda que esses modelos não possam ser aplicados de forma direta ao contexto brasileiro, eles oferecem caminhos que, se devidamente adaptados às realidades culturais, educacionais e políticas do país, podem contribuir para transformar a relação da sociedade com a energia nuclear. Reconhece-se, entretanto, que este estudo se baseou exclusivamente em análise documental e indicadores secundários, o que limita a captação direta de percepções sociais. Essa limitação aponta para a importância de estudos futuros que incluam entrevistas e dados primários, especialmente em regiões diretamente afetadas por empreendimentos nucleares, como Angra dos Reis. Conclui-se, portanto, que o futuro da energia nuclear no Brasil dependerá da capacidade de articulação entre governo, setor produtivo, instituições científicas e sociedade civil. Somente por meio desse diálogo ampliado será possível garantir que a energia nuclear deixe de ser vista como uma ameaça distante e passe a ser compreendida como uma ferramenta legítima para o desenvolvimento sustentável, a soberania energética e a transição para um modelo de baixo carbono — justo, confiável e socialmente aceito.

**Palavras-chave:** Energia nuclear; Angra 3; Política energética; Viabilidade econômica; Custo nivelado de energia (LCOE); Aceitação pública.

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introdução</b>                                                                                                                          | <b>8</b>  |
| <b>2. Conceitos Preliminares</b>                                                                                                              | <b>11</b> |
| 2.1 Ciclo do combustível nuclear                                                                                                              | 11        |
| 2.2 Tecnologia e segurança em reatores nucleares                                                                                              | 12        |
| 2.3 Planejamento energético e prospecção de novas usinas                                                                                      | 13        |
| 2.4 Comunicação e aceitação pública da energia nuclear                                                                                        | 14        |
| <b>3. Revisão Bibliográfica e Enunciado do Problema</b>                                                                                       | <b>15</b> |
| 3.1 Energia nuclear no Brasil e no mundo                                                                                                      | 15        |
| 3.1.1 A evolução do setor elétrico brasileiro: infraestrutura, regulação e a transição para fontes sustentáveis na matriz energética nacional | 16        |
| 3.1.2 Energia nuclear no Brasil e no mundo: evolução, impactos de grandes acidentes e perspectivas para o setor                               | 17        |
| 3.1.2.1 A expansão da energia nuclear antes de Chernobyl: avanços tecnológicos e crescimento global                                           | 18        |
| 3.1.2.2 Os impactos do acidente de Chernobyl na construção de reatores nucleares: regulações, desaceleração e mudanças no setor               | 19        |
| 3.1.2.3 O impacto do acidente de Fukushima na indústria nuclear: redução global, reconfiguração energética e busca por fontes sustentáveis    | 21        |
| 3.1.2.4 A energia nuclear no Brasil: expansão, recursos estratégicos e perspectivas para o futuro energético nacional                         | 23        |
| 3.1.3 Plano Nacional de Energia 2050: estratégias, investimentos e a expansão da energia nuclear no Brasil                                    | 24        |
| 3.1.3.1 Avanços tecnológicos, investimentos e perspectivas para a energia nuclear no Brasil                                                   | 25        |
| 3.2 Principais tecnologias e aspectos de segurança ligados à energia nuclear                                                                  | 27        |
| 3.2.1 O ciclo do combustível nuclear no Brasil: extração, enriquecimento e aplicação na geração de energia                                    | 27        |
| 3.2.2 A energia nuclear no Brasil: desenvolvimento, aplicações tecnológicas e perspectivas estratégicas                                       | 31        |
| 3.2.2.1 Angra 1: a primeira usina nuclear do Brasil e sua evolução operacional                                                                | 33        |
| 3.2.2.2 Angra 2: desenvolvimento tecnológico, eficiência operacional e contribuições para o setor energético brasileiro                       | 34        |
| 3.2.2.3 Angra 3: retomada da construção, financiamento e impacto na matriz energética brasileira                                              | 34        |
| 3.2.3 Processos de extração, enriquecimento e conversão de energia na geração nuclear                                                         | 35        |
| 3.2.3.1 Reservas, mineração e potencial de expansão da produção de urânio no Brasil                                                           | 36        |
| 3.2.3.2 Produção de pastilhas de combustível nuclear: conversão, sinterização e eficiência energética                                         | 36        |
| 3.2.3.4 Montagem e operação do combustível nuclear em reatores e armazenamento após o seu uso                                                 | 37        |
| 3.2.4 Aspectos ligados à segurança                                                                                                            | 38        |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.4.1 Normas, segurança e proteção nas usinas nucleares de Angra                                             | 39        |
| 3.2.4.2 Inovações tecnológicas e gestão da segurança na operação de usinas nucleares                           | 41        |
| 3.3 Aceitação pública e comunicação sobre a energia nuclear                                                    | 42        |
| 3.3.1 Evolução e fundamentos da Política Nuclear Brasileira                                                    | 43        |
| 3.3.1.1 A evolução da Política Nuclear Brasileira: diretrizes, projetos e desafios                             | 43        |
| 3.3.1.2 Fundamentos da Política Nuclear Brasileira: estrutura, diretrizes e desafios                           | 45        |
| 3.3.2 Desafios e percepções: a aceitação social da energia nuclear na universalização do acesso à eletricidade | 47        |
| 3.3.3 Desafios da aceitação pública da energia nuclear no Brasil: histórico, percepções e perspectivas         | 48        |
| <b>4. Metodologia</b>                                                                                          | <b>51</b> |
| 4.1 Metodologia Qualitativa e Categorias de Análise                                                            | 51        |
| 4.2 Análise Econômica Aplicada ao Estudo de Caso                                                               | 52        |
| 4.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)                                                                             | 52        |
| 4.2.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)                                                                            | 53        |
| 4.2.3 Payback                                                                                                  | 53        |
| 4.2.4 Custo Nivelado de Energia (LCOE)                                                                         | 53        |
| <b>5. Estudo de caso: Angra 3 e os Desafios da Aceitação Pública</b>                                           | <b>53</b> |
| 5.1 Contextualização do Projeto Angra 3                                                                        | 53        |
| 5.2 Controvérsias Institucionais e Políticas                                                                   | 54        |
| 5.3 Análise Econômica da Conclusão de Angra 3                                                                  | 55        |
| 5.3.1 Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR)                               | 56        |
| 5.3.2 Análise Comparativa via LCOE entre Fontes Fósseis e Energia Nuclear                                      | 57        |
| <b>Fonte: OECD/IEA/NEA (2020, p. 15).</b>                                                                      | <b>57</b> |
| 5.4 Cenários Econômico-Políticos: Retomar ou Abandonar?                                                        | 58        |
| 5.5 Análise da Aceitação Pública a partir de Documentos e Reportagens                                          | 59        |
| 5.6 Estratégias para Aumentar a Aceitação Pública da Energia Nuclear                                           | 61        |
| 5.6.1 A Experiência da Finlândia                                                                               | 61        |
| 5.6.2 A Experiência da França                                                                                  | 62        |
| <b>6. Considerações finais</b>                                                                                 | <b>64</b> |
| <b>7. Referências bibliográficas</b>                                                                           | <b>66</b> |

## 1. Introdução

A energia nuclear desempenha um papel estratégico no cenário energético global, sendo considerada uma alternativa viável para a diversificação da matriz elétrica e a redução das emissões de carbono (Ferreira, 2023). No Brasil, embora a matriz energética seja majoritariamente composta por fontes renováveis, a energia nuclear surge como uma opção complementar, especialmente no contexto do Plano Nacional de Energia 2050, que aponta para a expansão do setor. No entanto, sua aceitação pública ainda representa um desafio significativo (Souza, 2022).

Historicamente, a percepção da energia nuclear tem sido fortemente influenciada por acidentes emblemáticos, como Chernobyl e Fukushima, que geraram temores quanto à segurança dessa tecnologia (Souza; Lima, 2019). Entretanto, avanços significativos na área, como novas tecnologias de reatores, aprimoramento no ciclo do combustível e medidas de segurança reforçadas, tornaram as usinas nucleares cada vez mais seguras e eficientes. No Brasil, as usinas de Angra I, II e III e a cadeia produtiva do combustível nuclear desempenham um papel relevante na segurança energética nacional (Moura, 2022).

Há alguns aspectos que justificam essa afirmação. De acordo com Moura (2022), é correto evidenciar o fato de que as usinas de Angra I e Angra II atuam como fonte estável para o Sistema Interligado Nacional e respondem juntas por aproximadamente 2 % da geração elétrica brasileira (Abdala, 2023; Moura, 2024). A entrada prevista de Angra III, com capacidade projetada de 1.405 MW, busca ampliar essa participação e reduzir a dependência de termelétricas movidas a combustíveis fósseis (Eletronuclear, 2024).

Ainda conforme Moura (2022), a cadeia produtiva nacional do combustível nuclear, que abrange enriquecimento, conversão e fabricação de elementos combustíveis, representa um arranjo estratégico para a segurança energética. Essa estrutura sustenta a autonomia tecnológica, fortalece competências nacionais e apoia programas como o de propulsão naval nuclear (Guimarães, 2025). Tais aspectos reduzem vulnerabilidades externas e reforçam a segurança energética do país em longo prazo.

Diante desse cenário, estratégias de comunicação eficazes são essenciais para ampliar a aceitação social da energia nuclear. A transparência no diálogo com a população, a educação sobre os benefícios da tecnologia e o esclarecimento de



mitos e preocupações são fundamentais para consolidar a energia nuclear como uma fonte limpa e segura para o futuro energético do país (Camelo, 2017). Nessa perspectiva, este estudo sobre a aceitação pública da energia nuclear é de extrema relevância no contexto social, acadêmico e profissional, pois aborda um tema crucial para o futuro energético do Brasil e do mundo.

Socialmente, contribui para o debate sobre a segurança e sustentabilidade da matriz elétrica, auxiliando na desmistificação da energia nuclear e promovendo uma compreensão mais equilibrada de seus riscos e benefícios (Jerônimo, 2023). Ademais, no campo acadêmico, amplia a produção de conhecimento sobre a evolução do setor nuclear, bem como permite compreender, além de suas estratégias de desenvolvimento, os principais desafios, além de permitir aprofundar a análise das políticas energéticas e das tecnologias envolvidas no ciclo do combustível nuclear (Machado; Hansen, 2018).

Profissionalmente, o estudo é essencial para a qualificação de especialistas e formuladores de políticas, oferecendo suporte técnico e estratégico para a tomada de decisões no setor elétrico e nuclear (Guimarães, 2015). Com isso, busca-se não apenas fortalecer a segurança energética do país, mas também aprimorar a comunicação com a sociedade, garantindo um planejamento sustentável e alinhado às diretrizes do Plano Nacional de Energia 2050 (Takahashi; Taveira; Correa, 2021). A energia nuclear tem sido historicamente marcada por avanços tecnológicos e desafios de aceitação pública. No Brasil, apesar do potencial para contribuir com a segurança energética e a diversificação da matriz elétrica, sua expansão ainda enfrenta resistência social, influenciada por acidentes passados e pela falta de informações acessíveis à população. Nesse contexto, nota-se que o Plano Nacional de Energia 2050 prevê um papel estratégico para essa fonte, mas, para que sua implementação seja efetiva, é necessário superar barreiras relacionadas à resistência social e à transparência ao comunicar sobre os benefícios envolvidos (Machado, 2021).

Diante desse cenário, o problema de pesquisa que se coloca é: quais estratégias podem ser adotadas para aumentar a aceitação social da energia nuclear como uma fonte limpa e segura no Brasil? Nessa perspectiva, o objetivo geral é apresentar as estratégias para ampliar a aceitação pública da energia nuclear como uma fonte limpa e segura no Brasil. Os específicos serão: I) introduzir o cenário da

energia nuclear no Brasil e no mundo; II) identificar quais são as tecnologias e segurança no setor nuclear; e III) descrever como ocorre a aceitação pública quanto à temática no que concerne à divulgação de dados sobre a energia nuclear.

Além da revisão de literatura sobre os temas abordados, este estudo incluirá um estudo de caso sobre a região de Angra 3. O foco será a análise da viabilidade econômica da conclusão da usina, considerando fatores como custos, impacto no setor elétrico e retorno para a matriz energética nacional. Paralelamente, será verificada a aceitação pública em relação ao término da construção, investigando a percepção da população local e de outros setores da sociedade sobre os benefícios e desafios associados à operação da usina. Esse estudo permitirá compreender melhor as barreiras e oportunidades para a expansão da energia nuclear no Brasil.

## 2. Conceitos Preliminares

### 2.1 Ciclo do combustível nuclear

O ciclo do combustível nuclear compreende todas as etapas envolvidas na produção, utilização e descarte do combustível usado em reatores nucleares. Esse processo começa com a mineração do urânio, onde o mineral é extraído e transformado em concentrado de urânio, conhecido como "yellowcake" (Archila; Campos, 2021). Em seguida, ocorre a conversão e enriquecimento, onde o urânio é transformado em hexafluoreto de urânio e enriquecido para aumentar a concentração de urânio-235, o isótopo fissível responsável pela geração de energia nos reatores (Bastos; Moraes, 2019).

Após essa etapa, ocorre a fabricação do elemento combustível, onde o hexafluoreto de urânio é reconvertido em dióxido de urânio e transformado em pastilhas cerâmicas, que são agrupadas em varetas e montadas em conjuntos combustíveis para serem inseridos no núcleo do reator (Ferreira, 2023). Após a utilização no reator, o combustível pode seguir dois destinos: armazenamento e descarte definitivo ou reprocessamento para recuperação de materiais úteis, como plutônio e urânio remanescente (Souza, 2022).

Contextualizando a ausência de estratégia definitiva para o combustível irradiado no Brasil, permanece a análise técnica através de método multicriterial que demonstra a relevância de adoção de unidade de armazenamento seco (UAS) como alternativa para prolongar espaço nas piscinas e melhorar o gerenciamento conforme Pinho, Oliva e Maia (2024). Por outro lado, observa-se que, em sua tese de doutorado, Jonusan (2021) estudou os aspectos técnicos e de segurança para disposição futura do combustível irradiado no país o que reforçou a necessidade de solução de longo prazo.

Visando à implementação concreta da alternativa no território nacional, a unidade complementar de armazenamento a seco (UAS) em Angra recebeu autorização inicial em 2021 e recebeu licença de operação renovável por 40 anos, estando dimensionada para acomodar até 72 casks Hi-Storm FW e atender ao combustível irradiado até 2045 conforme anúncio da CNEN em abril de 2025 (World Nuclear News, 2025). Conforme Jonusan (2021) a solução a seco representa alternativa viável tecnicamente para complementação do armazenamento úmido e para organização futura da disposição final.

No Brasil, o ciclo do combustível nuclear é parcialmente fechado, pois há domínio sobre as etapas de mineração, conversão, enriquecimento e fabricação de combustível, mas o país ainda não realiza reprocessamento. A gestão eficiente desse ciclo é essencial para a segurança, economia e sustentabilidade da energia nuclear, garantindo um suprimento confiável e minimizando impactos ambientais (Souza; Lima, 2019).

## 2.2 Tecnologia e segurança em reatores nucleares

As usinas nucleares utilizam reatores que operam por meio da fissão controlada do urânio para geração de eletricidade. No Brasil, os reatores de Angra I, II e III pertencem à categoria reatores de água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor), que representam um dos tipos mais seguros e amplamente utilizados no mundo. Nessa tecnologia, a água pressurizada atua como refrigerante e moderador, garantindo que a reação nuclear ocorra de maneira controlada (Moura, 2022). Há alguns aspectos que o tornam seguros e que, portanto, devem ser evidenciados.

Macieira (2020) demonstrou que nos reatores de água pressurizada (PWR) tanto o coeficiente de reatividade do combustível ( $\alpha_f$ ) quanto o do moderador ( $\alpha_m$ ) apresentam valores negativos ao longo da queima, independentemente do revestimento utilizado, como Zircaloy ou SiC HNS. Essa característica assegura que, quando ocorre aumento de temperatura no núcleo, a reação nuclear é automaticamente desacelerada. Esse efeito é classificado como um mecanismo passivo de segurança e explica por que os PWR conseguem manter a reação de fissão de forma controlada, reduzindo riscos em operação normal e em cenários de acidente.

Já Souza (2022) ressaltou que os PWR contam com múltiplas camadas de proteção física, conhecidas como defesa em profundidade. O núcleo é contido em um vaso de pressão projetado para suportar altas pressões, cercado por aço e concreto espesso que funcionam como barreiras contra a liberação de radiação. Opera-se com dois circuitos independentes: o primário, pressurizado a cerca de 155 bar sem permitir ebulição, e o secundário, responsável por gerar vapor sem risco de contaminação. A separação entre circuitos garante que a radioatividade permaneça isolada, reforçando a confiabilidade e a segurança ambiental da tecnologia.

Além disso, os sistemas de segurança dos reatores incluem barras de controle, que absorvem nêutrons para regular a potência do reator, e barreiras físicas de contenção para evitar vazamentos de radiação (Camelo, 2017). A segurança nuclear é garantida por protocolos rigorosos, fiscalização constante e aprimoramento contínuo das tecnologias. As melhorias globais no setor nuclear resultam do aprendizado contínuo da exploração tecnológica ao longo dos anos, incluindo a adoção de sistemas de resfriamento passivos que funcionam sem necessidade de energia externa em emergências (Jerônimo, 2023).

Os acidentes de Chernobyl e Fukushima contribuíram para reforçar a relevância desse processo de aprimoramento já em andamento. No Brasil, as usinas seguem diretrizes da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Essas medidas garantem que a energia nuclear seja uma das fontes mais seguras de geração elétrica, com baixíssima taxa de acidentes em comparação com outras formas de geração de energia (Machado; Hansen, 2018).

### 2.3 Planejamento energético e prospecção de novas usinas

O planejamento energético é fundamental para garantir a segurança do abastecimento elétrico de um país, considerando a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de fontes fósseis. No contexto da energia nuclear, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) prevê a expansão do parque nuclear brasileiro, com a possível construção de novas usinas além de Angra III (Guimarães, 2015). A energia nuclear é vista como uma opção estratégica para complementar a matriz elétrica, reduzindo a vulnerabilidade a crises hídricas e garantindo uma geração de energia contínua e confiável (Machado, 2021).

A prospecção de novas usinas envolve análises técnicas, econômicas e ambientais para definir locais adequados e avaliar a viabilidade do investimento. Fatores como a disponibilidade de água para resfriamento, proximidade de centros de consumo e impacto ambiental são levados em consideração. No Brasil, estudos indicam que regiões do Nordeste e Sudeste possuem potencial para novas instalações. No entanto, a concretização desses projetos depende de investimentos, aprovação regulatória e aceitação pública, sendo necessária uma estratégia eficiente de comunicação e engajamento social (Machado; Hansen, 2018).

## 2.4 Comunicação e aceitação pública da energia nuclear

A aceitação pública da energia nuclear é um dos principais desafios para sua expansão, pois a percepção da população é influenciada por eventos históricos, desinformação e medo de acidentes (Takahashi; Taveira; Correa, 2021). No Brasil, a falta de conhecimento sobre o funcionamento das usinas e os avanços em segurança contribuem para uma visão negativa, dificultando o apoio a novos projetos. Estratégias de comunicação eficazes, como campanhas educativas e maior transparência por parte dos órgãos responsáveis, são essenciais para reverter esse cenário (Murayama; Schmid, 2021).

A comunicação sobre a energia nuclear deve ser baseada em dados científicos e esclarecimento de mitos, destacando os benefícios da tecnologia, como a baixa emissão de carbono e a confiabilidade energética (Archila; Campos, 2021). Pesquisas indicam que a aceitação tende a aumentar quando a população tem acesso a informações claras e participa do debate sobre o tema. No caso de Angra III, compreender a percepção da população local é fundamental para avaliar o impacto social da usina (Bastos; Moraes, 2019).

Dessa forma, uma abordagem proativa e educativa pode ajudar a consolidar a energia nuclear como uma fonte segura e sustentável para o futuro energético do Brasil.

### 3. Revisão Bibliográfica e Enunciado do Problema

A energia nuclear desempenha um papel fundamental no cenário energético global, sendo uma alternativa estratégica para garantir segurança energética e reduzir emissões de carbono. No Brasil, sua inserção na matriz elétrica ocorre em meio a desafios econômicos, tecnológicos e sociais (Murayama; Schmid, 2021). Para compreender esse contexto, é essencial examinar o setor elétrico brasileiro dentro do panorama mundial e a evolução da energia nuclear antes e depois dos acidentes de Chernobyl e Fukushima, que influenciaram diretamente políticas e percepções públicas sobre a tecnologia (Machado, 2021).

Além disso, a análise do Plano Nacional de Energia 2050 permite vislumbrar a prospecção futura das usinas nucleares no país. No campo tecnológico, o desenvolvimento das usinas nucleares brasileiras, como Angra I, II e III, evidencia o domínio parcial do ciclo do combustível nuclear, desde a mineração do urânio até a fabricação dos elementos combustíveis (Moura, 2022). Dessa maneira, a segurança operacional das usinas também é um ponto central, com medidas continuamente aprimoradas para evitar riscos e aumentar a confiabilidade da geração nuclear (Jerônimo, 2023).

No entanto, a aceitação pública da energia nuclear ainda é um obstáculo significativo. A trajetória do programa nuclear brasileiro, os desafios de universalização do acesso à eletricidade e as estratégias de comunicação adotadas pelo setor nuclear são fatores que influenciam a percepção da sociedade (Bastos; Moraes, 2019). Nesse sentido, a questão central sobre a qual este estudo se debruçará diz respeito à identificação de quais são as principais estratégias que podem ser adotadas para aumentar a aceitação social da energia nuclear como uma fonte limpa e segura no Brasil.

#### 3.1 Energia nuclear no Brasil e no mundo

O setor elétrico brasileiro se destaca no cenário mundial por sua matriz energética predominantemente renovável, com forte dependência da geração hidrelétrica. No entanto, desafios como crises hídricas e aumento da demanda impulsionam a necessidade de diversificação, levando à consideração de fontes como a nuclear (Ferreira, 2023). A energia nuclear, utilizada por diversos países, passou por uma evolução significativa ao longo das décadas, com mudanças nas políticas e na percepção pública após eventos marcantes, como os acidentes de

Chernobyl e Fukushima (Souza, 2022).

No Brasil, a energia nuclear teve um desenvolvimento gradual, sendo incorporada à matriz elétrica com as usinas de Angra I, II e a futura Angra III (Souza; Lima, 2019). Dessa forma, frisa-se que o Plano Nacional de Energia 2050 prevê a ampliação desse setor, com estudos sobre a viabilidade de novas usinas e o fortalecimento do ciclo do combustível nuclear no país (Moura, 2022).

Assim, a prospecção de novas plantas nucleares está associada à busca por segurança energética e redução de emissões, mas enfrenta desafios técnicos, econômicos e sociais que exigem planejamento estratégico e políticas de aceitação pública eficazes. Desse modo, essas questões serão debatidas neste tópico.

### 3.1.1 A evolução do setor elétrico brasileiro: infraestrutura, regulação e a transição para fontes sustentáveis na matriz energética nacional

Conforme exposto por Borges (2021), a infraestrutura elétrica do Brasil é composta por redes de transmissão, unidades geradoras e estruturas de distribuição. Esse sistema é segmentado em uma rede principal, chamada Sistema Interligado Nacional (SIN), que cobre grande parte do país, e em redes menores, conhecidas como Sistemas Isolados (SI), que operam principalmente na região amazônica. Nessa perspectiva, destaca-se que a coordenação e a supervisão dessas redes são responsabilidades do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A entidade foi criada em 1998 e submetida à regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Desde então, o planejamento e a organização do setor elétrico no Brasil são definidos a partir da análise dos recursos naturais disponíveis e da gestão operacional das redes transmissoras que compõem a estrutura energética nacional. Dessa forma, esse setor pode ser compreendido como um sistema econômico que engloba um conjunto de operações ligadas às etapas de geração, transmissão, distribuição e comercialização de eletricidade (Ferreira, 2023).

Além das instituições governamentais responsáveis pela formulação e execução das políticas públicas, integram esse sistema as empresas do setor energético e os agentes econômicos diretamente envolvidos no processo, incluindo investidores, representantes do poder público e consumidores. Nesse contexto, de acordo com a IEA (2019), há que se destacar que a estrutura da matriz energética global tem passado por transformações significativas, refletindo um crescimento



contínuo no uso de fontes sustentáveis para a produção de eletricidade.

No Brasil, a ampliação do uso dessas alternativas foi favorecida pela criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Essa iniciativa teve como foco principal minimizar o déficit de eletricidade e reduzir a liberação de gases associados ao efeito estufa, promovendo um modelo mais equilibrado e sustentável para a geração de energia (Souza, 2022).

No cenário mundial, a geração elétrica ainda é dominada por recursos não renováveis, com o carvão mineral sendo o principal insumo utilizado para esse fim. Assim, as fontes limpas representam apenas um quarto da matriz elétrica global, com as hidrelétricas desempenhando o papel mais relevante dentro desse segmento (IEA, 2019). Segundo projeções apresentadas por Nascimento e Alves (2021), espera-se que, até 2030, a participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira aumente em aproximadamente 23%.

Esse crescimento está diretamente associado à Política Nacional de Biocombustíveis, regulamentada pela Lei nº 13.576, de 2017, que estabelece metas alinhadas ao Acordo de Paris. Entre seus objetivos, destacam-se a otimização da eficiência energética nacional e a redução do consumo total de eletricidade em cerca de 10%, o que corresponde a 106 TWh (Brasil, 2017).

### 3.1.2 Energia nuclear no Brasil e no mundo: evolução, impactos de grandes acidentes e perspectivas para o setor

Este tópico tratará da evolução da energia nuclear no contexto global e nacional, destacando sua trajetória antes e depois dos principais acidentes que marcaram o setor. Inicialmente, será abordado o desenvolvimento da energia nuclear antes do desastre de Chernobyl, período em que a expansão dessa tecnologia ocorreu de forma acelerada.

Em seguida, serão analisados os impactos do acidente de 1986, que resultaram em mudanças regulatórias e na percepção pública sobre a segurança das usinas. Posteriormente, será discutido o efeito do desastre de Fukushima, ocorrido em 2011, que reforçou preocupações e levou a novas revisões nas políticas energéticas.

Por fim, será apresentada a situação da energia nuclear no Brasil, considerando sua inserção na matriz elétrica e as perspectivas para o setor.

### 3.1.2.1 A expansão da energia nuclear antes de Chernobyl: avanços tecnológicos e crescimento global

A expansão da energia nuclear como alternativa viável para a produção de eletricidade teve um crescimento expressivo no período pós-Segunda Guerra Mundial. Esse avanço foi ainda mais significativo na década de 1970, quando nações industrializadas e emergentes buscaram estruturar seus próprios programas nucleares. No Brasil, o interesse por essa tecnologia seguiu a tendência global, impulsionado pela necessidade de diversificar a matriz elétrica e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (Souza, 2022).

O cenário internacional também favoreceu essa busca, especialmente devido à crise do petróleo, que resultou em um aumento abrupto nos custos do barril, tornando urgente a exploração de outras fontes energéticas que garantissem maior estabilidade econômica e menor vulnerabilidade às oscilações do mercado (Martim, 1992). Assim, a percepção da energia nuclear como uma opção promissora para a geração de eletricidade sofreu uma reviravolta drástica em 26 de abril de 1986, quando um dos mais graves acidentes da história ocorreu na usina de Chernobyl (Souza; Lima, 2019).

O desastre foi causado por uma combinação de falhas operacionais e problemas estruturais no projeto do reator, agravados por uma queda abrupta no fornecimento de energia. Como consequência, ocorreu uma explosão que atingiu temperaturas superiores a 2000 °C, dispersando material radioativo em larga escala (Moura, 2022). A magnitude do evento teve impactos devastadores, com um número significativo de mortes imediatas e um grande contingente da população exposta à radiação, resultando em graves problemas de saúde pública e deslocamento em massa de moradores da região (Ferreira, 2023).

Após o desastre de Chernobyl, os debates sobre a segurança da energia nuclear se intensificaram, levando diversos países a revisar seus protocolos e adotar novas medidas de proteção para reduzir riscos em suas instalações (Camelo, 2017). No entanto, nota-se que, apesar da tragédia, a energia nuclear não foi completamente descartada como alternativa energética, sendo mantida em diversas nações como uma opção viável, desde que acompanhada de regulamentações mais rígidas e aprimoramentos tecnológicos nos reatores (Jerônimo, 2023).

A adoção de novas normas internacionais e o fortalecimento de órgãos reguladores foram algumas das ações implementadas para evitar a repetição de um

evento dessa magnitude (Machado; Hansen, 2018). Contudo, destaca-se que o impacto do acidente de Chernobyl perdurou por décadas e gerou uma mudança significativa na percepção pública sobre a segurança nuclear. Entretanto, no início do século XXI, a demanda por eletricidade continuava crescendo, e a energia nuclear permaneceu relevante em diversos países (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

Essa permanência foi impulsionada pela necessidade de reduzir a emissão de gases poluentes e pela eficiência dessa tecnologia na geração contínua de eletricidade. Contudo, em 2011, um novo episódio reacendeu as preocupações globais sobre os riscos da energia nuclear (Guimarães, 2015). O desastre ocorrido na usina de Fukushima, no Japão, foi desencadeado por um terremoto seguido de um tsunami, que comprometeu os sistemas de resfriamento dos reatores e provocou vazamentos radioativos (Murayama; Schmid, 2021).

Embora a causa do incidente tenha sido diferente da de Chernobyl, as consequências ambientais e sociais reforçaram as críticas à utilização da energia nuclear. O episódio levou alguns países a repensarem seus planos de expansão e até mesmo a desativarem gradualmente suas usinas. (Archila; Campos, 2021) No entanto, há que se ressaltar que, ao mesmo tempo em que despertou desconfiança, o acidente também impulsionou o desenvolvimento de reatores mais seguros e a adoção de novos protocolos emergenciais (Bastos; Moraes, 2019).

No Brasil, a trajetória da energia nuclear seguiu um caminho distinto, marcado por avanços e desafios. Desde a década de 1970, o país investiu no setor, consolidando projetos como Angra I e II. A construção de Angra III, por sua vez, enfrentou sucessivos atrasos, mas segue como parte do planejamento energético nacional (Souza; Lima, 2019). Apesar das preocupações globais, a energia nuclear no Brasil continua sendo considerada uma alternativa estratégica para garantir o abastecimento de eletricidade de forma estável e sem emissão de gases de efeito estufa (MACHADO, 2021).

A expansão desse setor, no entanto, depende de um equilíbrio entre investimentos, políticas de segurança rigorosas e aceitação pública.

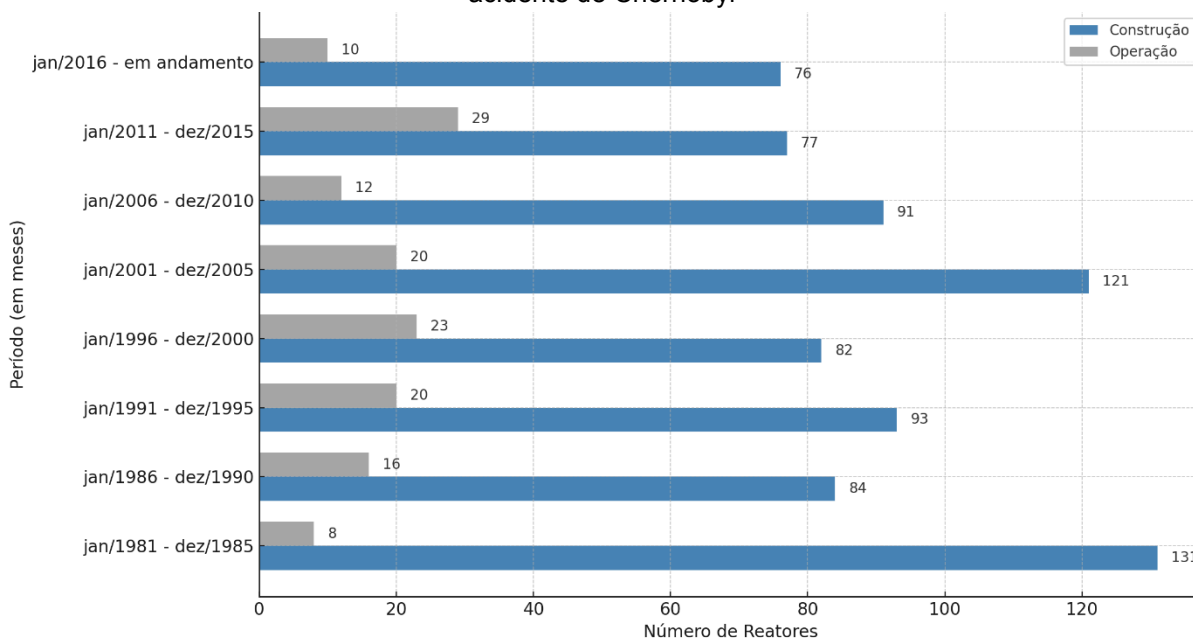
### 3.1.2.2 Os impactos do acidente de Chernobyl na construção de reatores nucleares: regulações, desaceleração e mudanças no setor

O desastre ocorrido em Chernobyl representou um marco significativo para a

indústria nuclear mundial, provocando uma série de mudanças regulatórias e impactando diretamente a construção de novas usinas (Moura, 2022). Após o acidente, reconhecido como um dos mais graves da história da energia nuclear, foram adotadas normas mais rígidas tanto no âmbito ambiental quanto na segurança operacional, o que gerou uma desaceleração na expansão desse setor (IAEA, 2019).

Nessa perspectiva, o Gráfico 1 ilustra essa tendência ao longo das décadas, evidenciando uma redução no número de reatores construídos conforme os anos avançaram:

Gráfico 1 – Evolução da construção de reatores nucleares ao longo das décadas e o impacto do acidente de Chernobyl



(Fonte: Adaptado pelos autores (2025) com base em Bastos e Moraes, 2019, p. 3).

Nos primeiros períodos analisados, entre 1981 e 1985, houve um volume expressivo de novas unidades em operação, atingindo um total de 131 reatores, com um tempo médio de construção de 84 meses. Entretanto, logo após o acidente de Chernobyl, ocorrido em 1986, a quantidade de reatores finalizados entre 1986 e 1990 já apresentou uma queda, totalizando 85, enquanto o tempo médio para conclusão aumentou para 93 meses. Essa retração se intensificou ainda mais entre 1991 e 1995, quando apenas 29 reatores foram concluídos, apesar do tempo médio de construção ter reduzido para 82 meses (Bastos; Moraes, 2019).

Nos anos seguintes, a construção de novos reatores continuou em declínio. No intervalo entre 1996 e 2000, apenas 23 unidades foram finalizadas, mas o tempo médio de edificação subiu drasticamente para 121 meses, sugerindo dificuldades

adicionais relacionadas a exigências regulatórias e processos de aprovação mais rigorosos. Entre 2001 e 2005, houve um leve aumento na quantidade de reatores concluídos, chegando a 20, enquanto o tempo médio de construção foi de 59 meses, indicando uma possível adaptação às novas exigências do setor (Bastos; Moraes, 2019).

No período de 2006 a 2010, o número de novas unidades voltou a cair, chegando a 12, enquanto o tempo necessário para sua construção aumentou para 77 meses. Já entre 2011 e 2015, foram finalizados 29 reatores, com um tempo médio de 68 meses. Por fim, em 2016, apenas 10 novas usinas foram concluídas, mas o tempo médio de construção foi de 76 meses, demonstrando que, mesmo com a queda no número de novos projetos, o prazo para sua implementação permaneceu elevado (Bastos; Moraes, 2019).

Assim, conclui-se que, após o acidente de Chernobyl, a construção de reatores nucleares passou por uma desaceleração acentuada, influenciada por um ambiente regulatório mais rígido e um aumento da preocupação pública em relação à segurança das usinas. A necessidade de atender a normas mais exigentes e garantir medidas adicionais de proteção resultou não apenas em um menor volume de novas instalações, mas também em prazos mais longos para sua conclusão, refletindo as mudanças estruturais que marcaram a indústria nuclear global desde então (Jerônimo, 2023).

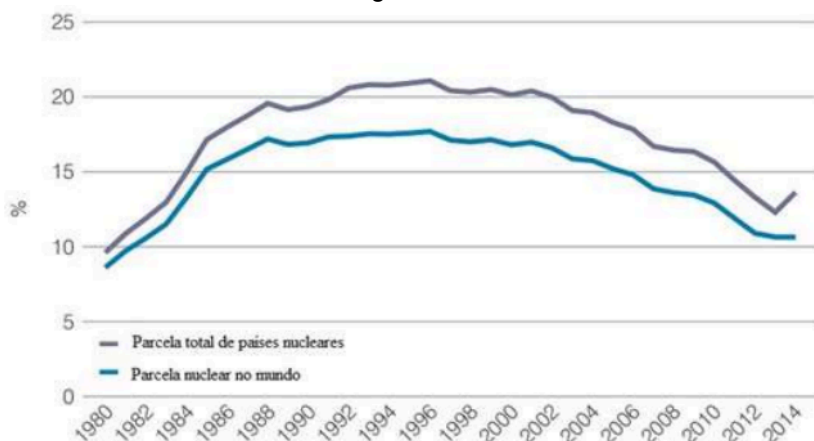
### 3.1.2.3 O impacto do acidente de Fukushima na indústria nuclear: redução global, reconfiguração energética e busca por fontes sustentáveis

A trajetória da energia nuclear no mundo passou por mudanças significativas nas últimas décadas, influenciadas por eventos de grande impacto. Um dos episódios mais marcantes ocorreu em 2011, quando um terremoto de magnitude 9 atingiu a costa oeste do Japão, seguido por um tsunami devastador. A cidade de Fukushima foi gravemente afetada, e os sistemas de resfriamento de quatro reatores nucleares falharam devido à inundação dos geradores a diesel de emergência (Camelo, 2017).

Como consequência, há que se destacar que ocorreu uma explosão causada pelo acúmulo de hidrogênio, seguida do colapso dos reatores, resultando na liberação de material radioativo no meio ambiente (Machado; Hansen, 2018). Nesse contexto, o Gráfico 2 apresenta a evolução da participação da energia nuclear na

matriz energética mundial ao longo dos anos, evidenciando um declínio progressivo. Em 1996, a energia nuclear representava cerca de 17% da produção global de eletricidade:

Gráfico 2 – Impacto do acidente de Fukushima e a redução da energia nuclear na matriz energética global



(Fonte: WNA, 2017 *apud* Bastos e Moraes, 2019, p. 4).

Desde então, essa participação tem diminuído continuamente, atingindo pouco mais de 10% nos anos mais recentes. A redução na dependência dessa fonte foi intensificada após o acidente de Fukushima, que reforçou preocupações quanto à segurança das usinas e levou diversos países a adotarem políticas de transição para outras formas de geração elétrica (Camelo, 2017). Contudo, a partir do final dos anos 1990, o Gráfico 2 mostra uma estabilização relativa no uso da energia nuclear, com uma participação global que se manteve em torno de 15% por alguns anos (Bastos; Moraes, 2019).

No entanto, após 2011, observa-se uma queda acentuada, refletindo o impacto direto do desastre japonês. Muitos governos reavaliaram seus planos para a energia nuclear, resultando na paralisação de projetos, fechamento de usinas mais antigas e adoção de estratégias voltadas para fontes renováveis, como solar e eólica (Takahashi; Taveira; Correa, 2021). A busca por alternativas consideradas mais seguras e sustentáveis tem levado a um afastamento gradual dessa tecnologia, com países reformulando suas políticas energéticas em resposta a eventos como Fukushima e às demandas crescentes por redução de riscos ambientais e avanços na segurança operacional (Murayama; Schmid, 2021).

### 3.1.2.4 A energia nuclear no Brasil: expansão, recursos estratégicos e perspectivas para o futuro energético nacional

A entrada do Brasil no setor nuclear ocorreu em 1972, com o início das obras de Angra 1, resultado de uma cooperação com a empresa norte-americana Westinghouse. Em 1975, um novo acordo foi firmado com a Alemanha, estabelecendo a parceria para a implementação das unidades Angra 2 e Angra 3 (Murayama; Schmid, 2021). Desse modo, destaca-se que a aquisição dessas usinas foi realizada por meio da Kraftwerk Union A.G., uma subsidiária da Siemens, consolidando a participação do Brasil no setor de geração de energia nuclear (Machado; Hansen, 2018).

O país possui uma das maiores reservas mundiais de urânio, ocupando a quinta posição global, e detém domínio sobre a tecnologia de enriquecimento desse mineral. Essa autonomia permite uma significativa redução de custos na produção de combustível nuclear, além de abrir a possibilidade de exportação para o mercado internacional. Diante das previsões de crescimento populacional, o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) prevê a construção de pelo menos quatro novas usinas nucleares, com o objetivo de garantir o abastecimento energético a longo prazo (Jerônimo, 2023).

Embora o Brasil conte com um cenário favorável para a produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, a viabilidade econômica, a disponibilidade de recursos naturais e a extensão territorial são fatores que influenciam a decisão sobre a expansão da energia nuclear (Takahashi; Taveira; Correa, 2021). Nesse aspecto, a tecnologia nuclear apresenta vantagens estratégicas, já que o país possui domínio sobre todas as etapas do ciclo de produção do urânio enriquecido, garantindo maior autonomia e estabilidade no setor elétrico (Archila; Campos, 2021).

Atualmente, duas usinas nucleares estão em operação no Brasil: Angra 1 e Angra 2. Além dessas, Angra 3 está em processo de construção, embora as obras tenham sido interrompidas devido a entraves financeiros relacionados ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). No entanto, há esforços por parte do Governo Federal para a retomada desse projeto. Ademais, a ampliação das atividades de mineração de urânio também está em discussão, visando fortalecer o setor nuclear do país (Machado, 2021).

O Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) estabelece projeções para a instalação de quatro a oito novas usinas nucleares no território nacional, proposta

que ainda precisa ser ratificada pelo Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), cuja publicação está em fase de finalização. Atualmente, Angra 1 e Angra 2 juntas representam 1,22% da capacidade total de geração de eletricidade no Brasil, operando com uma potência combinada de 1.990 MW (Bastos; Moraes, 2019).

### 3.1.3 Plano Nacional de Energia 2050: estratégias, investimentos e a expansão da energia nuclear no Brasil

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) apresenta um conjunto estruturado de diretrizes voltadas ao planejamento de longo prazo do setor elétrico brasileiro. Elaborado pelo Ministério de Minas e Energia, esse plano busca atrair investimentos privados e fomentar parcerias estratégicas com o governo federal. Seu propósito é delinear cenários para o desenvolvimento das diversas fontes energéticas no território nacional, garantindo segurança e sustentabilidade na matriz elétrica do país (Machado, 2021).

Diante desse contexto, há que se ressaltar que a formulação desse plano orienta decisões governamentais sobre a expansão da infraestrutura energética, considerando projeções estratégicas para o setor. Nessa perspectiva, pontua-se que, aprovado pela Portaria MME nº 451, de 16 de dezembro de 2020, o documento define ações voltadas à diversificação da matriz elétrica e ao fortalecimento das bases para futuras iniciativas no segmento de energia (Murayama; Schmid, 2021).

Entre as medidas estabelecidas pelo PNE 2050, destaca-se a previsão de um aporte financeiro na ordem de 30 bilhões de reais para a construção de seis novas usinas nucleares até meados de 2050. Estima-se que essas instalações acrescentem aproximadamente 1 GW de potência ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Além disso, salienta-se que o plano prevê a conclusão da usina de Angra 3, consolidando a continuidade do programa nuclear brasileiro (Souza, 2022).

Há também projeções para uma possível expansão do setor, com um acréscimo de até 8 GW na capacidade instalada até 2030, sendo as regiões Sudeste e Nordeste consideradas áreas prioritárias para a instalação de futuras centrais nucleares. Contudo, outro avanço recente no setor nuclear brasileiro foi a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), oficializada por meio da Medida Provisória nº 1.049, de 14 de maio de 2021 (Jerônimo, 2023).

Esse órgão, com sede no Rio de Janeiro, foi estabelecido a partir da cisão da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), sem aumento de despesas para o



governo federal. A criação da ANSN representa um marco regulatório importante, evidenciando uma mudança na gestão da política energética nacional, anteriormente centrada em um modelo estatal e dependente da geração elétrica com base em combustíveis fósseis (Murayama; Schmid, 2021).

Em um cenário de incertezas geradas pela pandemia de Covid-19, o PNE 2050 surge como um instrumento essencial para a formulação de estratégias que garantam a estabilidade do setor energético. Assim, destaca-se que o plano não apenas estabelece diretrizes para o desenvolvimento da matriz elétrica, mas também busca alinhar as políticas públicas às necessidades econômicas, sociais e ambientais do país (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

Dessa forma, sua implementação contribui para a criação de um sistema energético mais robusto e resiliente, capaz de enfrentar variações na demanda e responder a eventuais crises com maior eficiência.

#### 3.1.3.1 Avanços tecnológicos, investimentos e perspectivas para a energia nuclear no Brasil

A introdução de reatores nucleares de última geração, classificados como III+ e IV, trouxe avanços significativos para o setor energético. Nessa perspectiva, observa-se que esses reatores apresentam uma série de benefícios, como menor necessidade de capital inicial, prazos reduzidos para conclusão das obras, possibilidade de produção em larga escala, ausência de custos de descomissionamento e maior adaptabilidade a variações na demanda elétrica (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

Entre essas inovações, destacam-se os Pequenos Reatores Modulares (PRM), cuja tecnologia já se encontra em operação em países como a China, que conectou à rede em 2021 o reator de alta temperatura HTR-PM, atualmente em operação comercial (World Nuclear Report, 2024), e a Rússia, que inaugurou em 2020 a usina flutuante Akademik Lomonosov equipada com dois reatores KLT-40S (World Nuclear Association, 2025a). No Brasil, embora não haja unidades em funcionamento, discute-se a possibilidade de implantação futura como alternativa estratégica (Assi; Sabundjian; Fang, 2024).

Conforme a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2023 *apud* Arthur Little, 2025), os PRM também conhecidos como *Small Modular Reactors* (SMR), são caracterizados por apresentarem potência elétrica de até 300 MWe por

unidade. Além disso, a Comissão Europeia (2025) esclarece que esses reatores podem variar desde aproximadamente 20 MWe até 300 MWe, havendo ainda projetos em desenvolvimento que contemplam faixas menores, como 15 MWe (European Commission, 2025). Já a World Nuclear Association (2025b) reforça que a modularidade desses sistemas permite produção seriada em fábrica, reduzindo custos de construção e prazos de implantação.

No contexto político e econômico, diversas estratégias estão sendo analisadas para garantir a viabilidade financeira da energia nuclear no Brasil. Segundo a Associação Brasileira de Energia Nuclear (ABEN), a participação do setor privado é considerada um fator essencial para viabilizar investimentos voltados à retomada da construção de Angra 3. Esse projeto encontra-se em avaliação pelo Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) e pode atrair o interesse de grandes empresas internacionais do setor nuclear (Machado; Hansen, 2018).

Entre as possíveis investidoras estão as chinesas Spic e CNNC, a francesa EDF, a norte-americana Westinghouse e a russa Rosatom, esta última reconhecida como uma das principais desenvolvedoras de usinas nucleares no mundo. A inclusão de capital privado estrangeiro no setor nuclear brasileiro também pode influenciar positivamente as tarifas de eletricidade. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), essa medida poderá reduzir os custos para os consumidores, ajustando os valores atualmente praticados, que, em 2021, foram estipulados pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em R\$ 480/MWh (Machado, 2021).

No âmbito do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), as projeções para a expansão das usinas termonucleares se concentram em dois fatores principais: a possibilidade de redução dos custos de implantação e operação e a definição de uma política energética que contemple a adição de 8 GW a 10 GW de capacidade nuclear à matriz elétrica do país (MURAYAMA; SCHMID, 2021).

O crescimento da energia nuclear no Brasil dependerá, portanto, de medidas estratégicas voltadas à padronização de projetos, otimização dos prazos de construção e aprimoramento das técnicas utilizadas na implementação de novas usinas. O avanço dessas diretrizes poderá consolidar a energia nuclear como uma alternativa competitiva no contexto energético nacional, promovendo maior eficiência na geração elétrica e fortalecendo a segurança energética do país.

### 3.2 Principais tecnologias e aspectos de segurança ligados à energia nuclear

Este tópico abordará as tecnologias aplicadas ao setor nuclear no Brasil, abrangendo desde a infraestrutura das usinas em operação até os processos envolvidos no ciclo do combustível nuclear. Serão discutidas as especificidades das unidades nucleares do país, incluindo as características e funcionamento das usinas já ativas e em construção.

Além disso, será explorado o ciclo do combustível, passando pelas etapas de extração do urânio, conversão, enriquecimento isotópico e fabricação dos elementos combustíveis. Por fim, serão analisados os aspectos de segurança das usinas termonucleares, considerando o cenário atual e as medidas implementadas para aprimorar a confiabilidade e a segurança operacional do setor nuclear brasileiro.

#### 3.2.1 O ciclo do combustível nuclear no Brasil: extração, enriquecimento e aplicação na geração de energia

O Brasil detém aproximadamente 5,3% das reservas globais de urânio, ocupando a quinta posição no ranking mundial de detentores desse recurso mineral. No entanto, a exploração do urânio no país foi interrompida na década de 1970, abrangendo apenas um terço do território nacional. Essa limitação se deve, em grande parte, à tecnologia disponível na época, que possibilitou a identificação de jazidas superficiais, sem um levantamento mais aprofundado sobre o potencial total do minério (Jerônimo, 2023).

Segundo Teles (2025), o Brasil detém cerca de 5 % das reservas globais de urânio, com aproximadamente 70 % da área com características geológicas favoráveis em Caetité ainda disponível para novas concessões. Além disso, de acordo com a World Nuclear Association via USGS (2024), o país possui cerca de 632.000 toneladas de reservas de tório, colocadas entre as maiores do mundo, o que reforça o seu potencial estratégico em combustíveis nucleares alternativos.

As reservas já confirmadas somam cerca de 309 mil toneladas de urânio, mas estimativas apontam que, considerando recursos adicionais, o país pode atingir um total aproximado de 800 mil toneladas de triuranato de octaurânio. Se essa previsão se confirmar, o Brasil passaria a ocupar a terceira posição entre as maiores reservas do mundo. Na natureza, o urânio é encontrado principalmente na forma de óxidos, sendo o triuranato de octaurânio a configuração química mais estável presente no meio ambiente (Jerônimo, 2023).

Assim, a Figura 1 ilustra a distribuição das jazidas de urânio já identificadas no Brasil, evidenciando sua ampla dispersão pelo território nacional. O mapeamento desses depósitos é fundamental para a formulação de estratégias voltadas à exploração e aproveitamento desse recurso, que desempenha um papel crucial na matriz energética e na autonomia tecnológica do país:

Figura 1 – Reservas de urânio no Brasil: distribuição geográfica e potencial estratégico



(Fonte: Bastos e Moraes, 2019, p. 5)

No Brasil, a única mina de urânio em operação é administrada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e está localizada na região de Caetité, no sudoeste da Bahia. Essa unidade encontra-se na área de Lagoa Real, onde se estima haver uma reserva de aproximadamente 110 mil toneladas de urânio, caracterizada por sua elevada pureza. O método empregado para a extração desse mineral baseia-se na lixiviação em pilha, um processo que envolve a aplicação de ácido sulfúrico sobre o minério depositado (Camelo, 2017).

Esse ácido é pulverizado na parte superior da pilha de minério, promovendo a dissolução do urânio. Posteriormente, os resíduos da lixiviação são coletados na base da estrutura para posterior tratamento e descarte adequado (Bastos; Moraes, 2019). Após a extração, a solução resultante passa por um processo de secagem em um forno calcinador múltiplo, originando um composto concentrado de óxido de urânio, conhecido como yellow-cake (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

No entanto, para que esse material possa ser utilizado nas etapas seguintes da cadeia produtiva, ele precisa ser convertido em hexafluoreto de urânio, substância que permite um manuseio mais eficiente durante o enriquecimento isotópico (Bastos; Moraes, 2019). No Brasil, o processo de enriquecimento do urânio ocorre por meio da ultracentrifugação, técnica baseada na utilização da força

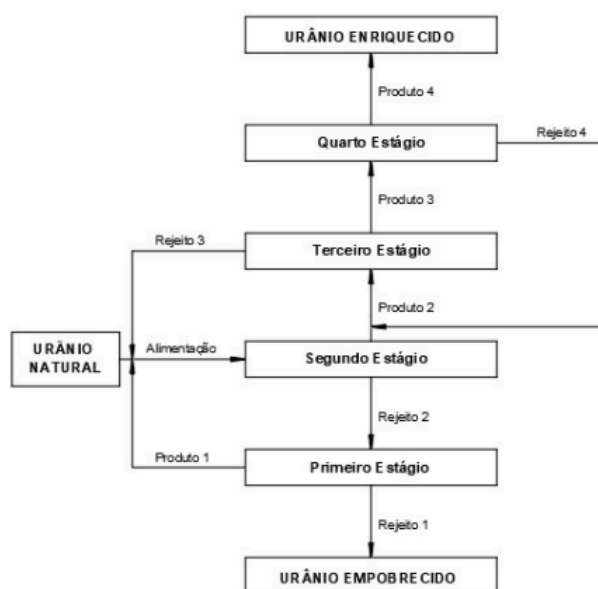
centrífuga para separar isótopos do hexafluoreto de urânio com diferentes massas moleculares (Camelo, 2017).

Para abastecer os reatores das usinas de Angra 1 e Angra 2, o urânio precisa alcançar um nível de enriquecimento entre 3 % e 5 % de  $UF_6$ , garantindo sua eficiência na geração de energia. Conforme a World Nuclear Association (2025b), reconhece-se que esse intervalo de enriquecimento é utilizado na maioria das usinas termonucleares do tipo PWR e BWR no mundo, caracterizando-se como o padrão necessário para operação segura e contínua dos reatores nucleares comerciais.

Para atingir essa concentração, são utilizadas ultracentrífugas organizadas em série, formando um sistema contínuo de enriquecimento. Nesse arranjo, o gás com maior concentração de  $U^{235}F_6$  em um estágio alimenta o estágio seguinte, enquanto a fração empobrecida retorna ao estágio anterior. Esse ciclo se repete sucessivamente, resultando na obtenção do material com a pureza necessária para utilização nos reatores nucleares brasileiros (Murayama; Schmid, 2021).

A Figura 2 ilustra esse processo, evidenciando a dinâmica da reciclagem e separação isotópica ao longo das diferentes fases de enriquecimento:

Figura 2 – Extração e enriquecimento do urânio no Brasil: processos e aplicações na indústria nuclear



(Fonte: Bastos e Moraes, 2019, p. 6)

A conversão do hexafluoreto de urânio em dióxido de urânio é uma etapa fundamental na produção do combustível nuclear. Para que essa transformação ocorra, o  $UF_6$  é submetido a um aquecimento até atingir o estado gasoso e, em seguida, combinado com gás carbônico e amônia. A reação entre esses compostos

resulta na formação de tricarbonato de amônio e urânio, que posteriormente é encaminhado para um forno onde recebe a adição de hidrogênio e vapor d'água (Moura, 2022).

A interação desses elementos dá origem ao dióxido de urânio  $\text{UO}_2$ , material essencial para a fabricação do combustível nuclear utilizado nos reatores. Após essa etapa, o  $\text{UO}_2$  passa por um processo de sinterização, em que é compactado sob condições controladas de temperatura e pressão. Esse procedimento garante que a porosidade das pastilhas seja mantida em aproximadamente 5% do volume total da peça. Essa configuração permite uma eficiente retenção dos gases liberados durante a fissão nuclear, sem comprometer as propriedades térmicas e estruturais do material (Murayama; Schmid, 2021).

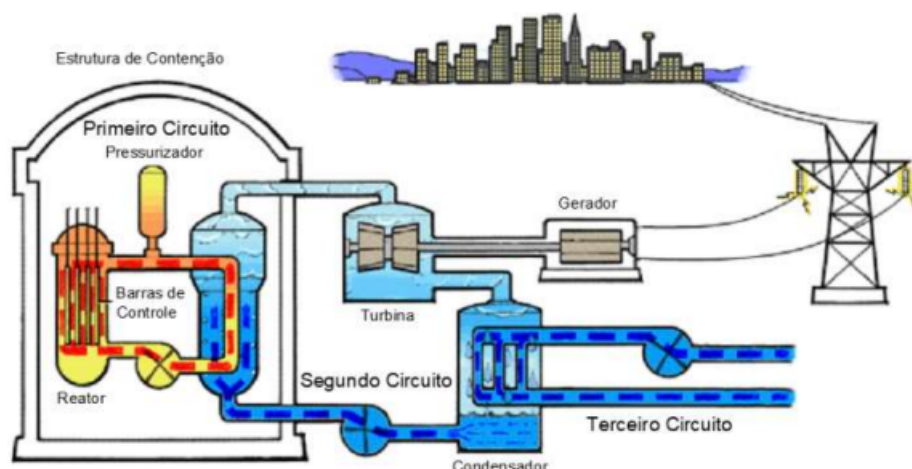
As pastilhas de dióxido de urânio são então dispostas em varetas metálicas fabricadas a partir de ligas de zircônio, como zircaloy ou zirlo. Essas varetas são agrupadas e organizadas com auxílio de grades espaçadoras, formando os elementos combustíveis que serão inseridos nos reatores nucleares. Os reatores empregados nas usinas de Angra 1 e Angra 2 pertencem à categoria dos reatores de água pressurizada (PWR). Atualmente, essa tecnologia corresponde a cerca de 65% dos reatores em operação no mundo, enquanto aproximadamente 25% utilizam o modelo de reator de água fervente (BWR) (Souza; Lima, 2019).

Apenas uma fração reduzida, equivalente a 10%, ainda opera com tecnologias mais antigas, que tendem a ser desativadas nos próximos anos. O funcionamento de uma usina PWR ocorre por meio da interação entre três circuitos independentes. No primeiro estágio, a fissão dos átomos de urânio gera calor, que aquece a água no interior do reator a uma temperatura de aproximadamente 320 °C. Para evitar a vaporização da água nesse estágio, o sistema opera sob uma pressão elevada de cerca de 16 Mpa (Souza, 2022).

O calor gerado nesse primeiro circuito é transferido para o segundo circuito, onde ocorre a vaporização da água, formando um fluxo de vapor que movimenta uma turbina conectada a um gerador em rotação de 1800 rpm. Após essa conversão de energia térmica em energia mecânica, o vapor passa por um condensador, onde é resfriado por meio de um terceiro circuito, que bombeia água diretamente do oceano para manter o equilíbrio térmico do sistema (Ferreira, 2023). Assim, a Figura 3 apresenta uma ilustração detalhada desses três circuitos, demonstrando os principais componentes e o fluxo de calor ao longo do processo de geração de

energia elétrica nas usinas nucleares de Angra.

Gráfico 3 – Esquema dos três circuitos de uma usina nuclear PWR



(Fonte: Bastos e Moraes, 2019, p. 7)

A regulação do movimento dos nêutrons no interior do reator é essencial para a operação eficiente de uma usina termonuclear. Para isso, são empregados materiais com capacidade de absorção de nêutrons, permitindo o controle da reação no reator. Esses elementos ajudam a manter a potência distribuída de maneira uniforme no núcleo, além de compensar a reatividade, que corresponde à medida da variação da taxa de reação nuclear em relação ao estado crítico do reator, durante o processo de queima do combustível (Bastos; Moraes, 2019).

### 3.2.2 A energia nuclear no Brasil: desenvolvimento, aplicações tecnológicas e perspectivas estratégicas

As usinas nucleares são instalações industriais equipadas com reatores projetados para a geração de eletricidade por meio da fissão nuclear. Esse processo ocorre a partir da divisão controlada dos núcleos de átomos de urânio enriquecido, que libera grande quantidade de energia térmica utilizada para aquecer a água e produzir vapor, o qual movimenta turbinas conectadas a geradores elétricos (Murayama; Schmid, 2021). O urânio enriquecido, geralmente na forma de dióxido de urânio ( $\text{UO}_2$ ), é o principal combustível empregado nessas instalações, sendo essencial para a sustentação da reação nuclear controlada (Murayama; Schmid, 2021).

Os reatores nucleares diferenciam-se por diversas características operacionais. Entre os principais critérios de classificação estão a energia cinética dos nêutrons predominante no processo de fissão, a composição do combustível

nuclear, a configuração do conjunto formado pelo combustível e pelo moderador, o tipo de moderador utilizado, o refrigerante empregado para dissipação de calor e a finalidade da usina. Essas variáveis determinam a estrutura e a funcionalidade de cada reator, influenciando sua eficiência e segurança (Souza; Lima, 2019).

Atualmente, existem 443 reatores nucleares em operação ao redor do mundo, enquanto cinco estão desativados e outros 52 seguem em construção. Essas unidades são divididas em duas categorias principais: reatores de potência e reatores de pesquisa. Os primeiros são projetados para a produção de eletricidade em larga escala, sendo empregados no fornecimento de energia para redes elétricas nacionais. Já os reatores de pesquisa possuem diversas finalidades, servindo como fontes de emissão de nêutrons e raios gama (Moura, 2022).

Suas aplicações incluem experimentos em física nuclear, irradiação para obtenção de radioisótopos e atividades industriais, agrícolas e médicas. O desenvolvimento do setor nuclear brasileiro teve início na década de 1960, quando o governo federal, em parceria com a União, lançou o Programa Nuclear Brasileiro (PNB). A criação desse programa foi formalizada por meio do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), com o objetivo de estabelecer a produção de energia nuclear no país (Camelo, 2017).

Para viabilizar essa iniciativa, foi concebida a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), situada no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro. Esse complexo é composto por três usinas nucleares: Angra 1, Angra 2 e Angra 3, sendo a última ainda em fase de construção. A aplicação da tecnologia nuclear no Brasil vai além da geração de eletricidade, abrangendo setores estratégicos como medicina, indústria e defesa. Na área médica, os radioisótopos são empregados na produção de radiofármacos, diagnóstico de doenças e esterilização de materiais hospitalares (Camelo, 2017).

Nessa perspectiva, há que se salientar que, no setor industrial, a tecnologia nuclear auxilia no controle de qualidade, na detecção de falhas em estruturas de engenharia, na inspeção de soldas e no levantamento geológico de aquíferos. Já na área militar, o Brasil mantém o Programa Nuclear da Marinha, iniciado em 1979, que tem o propósito de dominar o ciclo do combustível nuclear e desenvolver o protótipo de reator para submarino de propulsão nuclear (Marinha do Brasil, 2025).

Esse programa compõe parte do Programa de Desenvolvimento de Submarinos – PROSUB, instituído em 2008, cuja finalidade é produzir quatro



submarinos convencionais e um submarino nuclear, além de construir complexo industrial em Itaguaí (Marinha do Brasil, 2024). O PROSUB envolve cerca de 700 empresas, cooperação com 23 universidades ou instituições de pesquisa e gera aproximadamente 60 000 empregos diretos e indiretos (Brasil, 2024). Dessa forma, a energia nuclear desempenha papel relevante tanto em aplicações civis quanto em estratégias de defesa do país.

#### 3.2.2.1 Angra 1: a primeira usina nuclear do Brasil e sua evolução operacional

Em 1971, o Brasil formalizou um acordo com os Estados Unidos para a aquisição de sua primeira usina nuclear, que recebeu o nome de Angra 1. Esse projeto foi desenvolvido pela empresa norte-americana Westinghouse e marcou o início da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA). O contrato estabelecido seguiu o modelo *turnkey*, ou seja, tratou-se apenas da compra da unidade, sem envolver qualquer processo de transferência de tecnologia, limitando o acesso do Brasil ao conhecimento técnico necessário para o desenvolvimento autônomo dessa fonte energética (Machado; Hansen, 2018).

Angra 1 foi projetada para operar com um reator do tipo Pressurized Water Reactor (PWR), tecnologia amplamente utilizada no setor nuclear, sendo responsável pelo funcionamento de aproximadamente 230 unidades ao redor do mundo. Em 1985, a usina iniciou suas operações, tornando-se a primeira instalação desse tipo a gerar eletricidade no país. Atualmente, sua capacidade de potência instalada corresponde a 640 megawatts (MW), contribuindo significativamente para o abastecimento do sistema elétrico brasileiro (Guimarães, 2015).

Durante os primeiros anos de funcionamento, Angra 1 enfrentou desafios técnicos que impactaram sua operação. No entanto, ao longo do tempo, a usina conseguiu manter um índice elevado de produção, consolidando-se como um ativo estratégico para a geração de energia no Brasil. A Comissão Nacional de Energia Nuclear autorizou a extensão da vida útil da usina de Angra 1, permitindo que sua operação se estenda até o ano de 2044, o que representa 20 anos adicionais em relação à licença original de 40 anos, desde que sejam cumpridos os critérios técnicos de segurança estabelecidos (CNEN, 2024).

### 3.2.2.2 Angra 2: desenvolvimento tecnológico, eficiência operacional e contribuições para o setor energético brasileiro

Observa-se que a segunda usina nuclear brasileira, Angra 2, entrou em operação comercial no ano de 2001, sendo equipada com um reator do tipo Pressurized Water Reactor (PWR), de tecnologia alemã. Desenvolvida pela empresa Areva NP (Siemens), anteriormente conhecida como Kraftwerk Union (KWU), essa unidade possui capacidade para suprir a demanda energética de uma cidade com cerca de dois milhões de habitantes (Murayama; Schmid, 2021).

A construção de Angra 2 foi viabilizada pelo acordo nuclear firmado entre Brasil e Alemanha em 1975. Esse compromisso possibilitou a transferência da tecnologia de jato-centrifugação, além da aquisição do reator nuclear PWR. Como resultado, o país avançou significativamente no desenvolvimento do setor, adquirindo domínio sobre quase todas as etapas do ciclo de produção do combustível nuclear, o que representou um marco na evolução tecnológica nacional (Archila; Campos, 2021).

Erguida em 1981, a usina tem apresentado um desempenho exemplar desde o início de suas operações, destacando-se como uma das principais contribuições para a otimização do sistema energético brasileiro (Souza; Lima, 2019). Desde então, nota-se que o seu funcionamento tem sido crucial para reduzir a necessidade de uso dos reservatórios das usinas hidrelétricas, ajudando a minimizar os impactos de períodos de racionamento de eletricidade (Machado; Hansen, 2018).

Com uma potência instalada de 1.350 megawatts (MW), Angra 2 alcançou posições de destaque no cenário global. No ano de 2009, figurou como a trigésima terceira maior produtora de energia entre as 436 usinas nucleares em funcionamento no mundo. Em comparação com as 50 unidades nucleares mais eficientes dos Estados Unidos, a usina ocupou a 21ª colocação, conforme avaliação baseada nos indicadores de desempenho da Associação Mundial de Operadores Nucleares (Murayama; Schmid, 2021).

### 3.2.2.3 Angra 3: retomada da construção, financiamento e impacto na matriz energética brasileira

Com cerca de dois terços das obras civis concluídas, Angra 3 será a terceira unidade da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), compartilhando

características estruturais e operacionais com Angra 2. Sua construção, no entanto, foi interrompida em 2015 em decorrência de investigações que apontaram irregularidades administrativas e indícios de superfaturamento no projeto, no âmbito da operação Lava Jato. Localizada na praia de Itaorna, em Angra dos Reis (RJ), a usina terá capacidade instalada de 1.405 megawatts e poderá gerar anualmente mais de 12 milhões de megawatts-hora (Souza; Lima, 2019).

A energia elétrica produzida pela unidade será suficiente para suprir a demanda das cidades de Belo Horizonte e Brasília pelo mesmo período, correspondendo a aproximadamente metade do consumo energético do estado do Rio de Janeiro. O avanço das obras já alcança 65% do total planejado, considerando as diversas etapas envolvidas na execução do empreendimento. O financiamento do projeto está sob responsabilidade da Eletrobras, que gerencia os empréstimos destinados à conclusão da usina (Machado, 2021).

Os recursos aplicados na contratação de serviços e aquisição de equipamentos no mercado nacional provêm de financiamentos concedidos pelo BNDES. Já a importação de maquinário e a contratação de serviços internacionais são viabilizadas por meio de um contrato firmado com a Caixa Econômica Federal. Em 2015, o projeto recebeu um aporte de R\$ 5,3 bilhões, de um orçamento total estimado em R\$ 14,8 bilhões em custos diretos. Do montante total, aproximadamente 75% serão direcionados a investimentos internos, promovendo o fortalecimento da indústria nuclear nacional e estimulando o desenvolvimento econômico do setor (Murayama; Schmid, 2021).

### 3.2.3 Processos de extração, enriquecimento e conversão de energia na geração nuclear

Inicialmente, as tecnologias voltadas para a obtenção de combustíveis nucleares no Brasil foram organizadas em dois grupos principais. O primeiro abrange os processos de extração de materiais radioativos, enquanto o segundo refere-se ao enriquecimento do urânio. A demanda por esse minério está relacionada à capacidade produtiva das minas em operação, à estimativa de vida útil das usinas em funcionamento e aos critérios estabelecidos pelas empresas do setor nuclear para o enriquecimento do combustível (Camelo, 2017).

Além disso, relaciona-se com a eficiência energética das novas unidades geradoras e a tecnologia empregada nos reatores das usinas term nucleares.

Assim, a produção de energia nuclear ocorre por meio de quatro fases essenciais. O ciclo do combustível nuclear envolve uma série de etapas fundamentais para preparar e enriquecer o urânio, possibilitando sua utilização eficiente nos reatores. Esse processo garante que o combustível atenda aos padrões exigidos para operação segura e eficaz das usinas, contribuindo para o aproveitamento máximo do potencial energético do urânio (Machado; Hansen, 2018).

#### 3.2.3.1 Reservas, mineração e potencial de expansão da produção de urânio no Brasil

A exploração do urânio no Brasil é realizada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB) na unidade de concentração de urânio (UCU), localizada no município de Caetité, na Bahia. Assim como ocorre em outras atividades de extração mineral, a mineração do urânio gera impactos ambientais, exigindo a adoção de medidas rigorosas para controle da radiação emitida naturalmente pelo minério. A intensidade dessa radiação é medida em milisieverts, conforme estabelecido pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), sendo monitorada de acordo com as diretrizes de segurança para minimizar riscos ambientais e ocupacionais (Machado, 2021).

A única instalação brasileira dedicada ao enriquecimento de urânio está localizada no município de Resende, no estado do Rio de Janeiro. A quantidade de enriquecimento do urânio varia conforme sua finalidade. De acordo com um estudo de 2019, torna-se correto salientar que, especificamente no caso das aplicações médicas, que envolvem, por exemplo, a produção de radioisótopos, esse índice pode chegar a 20%. Contudo, quando utilizado para fins militares, como para a fabricação de artefatos nucleares, é necessário um enriquecimento acima de 95% (Souza; Lima, 2019).

O processo de separação isotópica no Brasil é realizado por meio de ultracentrífugas desenvolvidas com tecnologia nacional, fruto da colaboração entre o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Essa parceria tem sido fundamental para o avanço da independência tecnológica do país no setor nuclear (Camelo, 2017).

#### 3.2.3.2 Produção de pastilhas de combustível nuclear: conversão, sinterização e eficiência energética

Após a etapa de enriquecimento, o hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ) passa por um processo de conversão para dióxido de urânio ( $\text{UO}_2$ ), que assume a forma de um pó

fino utilizado na fabricação de pastilhas de combustível nuclear. Esse procedimento ocorre na unidade da INB em Resende, onde o material é preparado para ser empregado nos reatores das usinas nucleares. Com o dióxido de urânio já refinado, ele é moldado em pequenos cilindros de aproximadamente um centímetro de altura e diâmetro (Jerônimo, 2023).

Inicialmente, o pó de  $\text{UO}_2$  é misturado a outros compostos do mesmo elemento e, em seguida, transportado para uma prensa rotativa automatizada, onde são formadas as chamadas pastilhas verdes. Essas unidades prensadas ainda não possuem a resistência necessária para suportar as condições extremas dentro de um reator nuclear, razão pela qual são encaminhadas para um forno de sinterização. Durante esse estágio, as pastilhas são aquecidas a uma temperatura de  $1750^\circ\text{C}$ , adquirindo maior densidade e resistência estrutural para suportar o ambiente de operação no interior do reator (Moura, 2022).

Apenas duas dessas pastilhas são suficientes para garantir eletricidade a uma residência de porte médio por um mês. Essa fase do processo produtivo é realizada na seção de fabricação de pastilhas da FCN, na unidade da INB localizada em Resende, no estado do Rio de Janeiro (Souza, 2022).

#### 3.2.3.4 Montagem e operação do combustível nuclear em reatores e armazenamento após o seu uso

Na fase final do processo de fabricação do combustível nuclear, as pastilhas de urânio são inseridas em varetas cilíndricas feitas de uma liga metálica altamente resistente chamada zircaloy. Esse material foi desenvolvido para minimizar os efeitos da oxidação no revestimento do combustível, especialmente em situações adversas que possam ocorrer durante a operação do reator. Antes de serem preenchidas com as pastilhas, as varetas de zircaloy passam por uma rigorosa verificação dimensional por meio de testes ultrassônicos, garantindo precisão e uniformidade em sua estrutura (Ferreira, 2023).

Após essa inspeção, os tubos são submetidos a um processo de limpeza minuciosa para eliminar quaisquer impurezas. O empilhamento das pastilhas dentro das varetas é realizado sob uma pressão controlada, assegurada pelo uso de molas que mantêm a estabilidade do conjunto. Para evitar o contato direto entre o urânio e a estrutura metálica, são utilizados isolantes térmicos compostos por óxidos de alumínio, que desempenham um papel fundamental na dissipação do calor gerado

durante a fissão nuclear (Souza; Lima, 2019).

Dessa maneira, o elemento combustível permanece em operação no interior do reator por três ciclos completos, correspondendo a aproximadamente três anos de uso contínuo. Após esse período, as varetas que contêm o material irradiado são removidas e armazenadas de forma segura. Inicialmente, elas permanecem em piscinas especiais localizadas dentro das instalações da usina, destinadas ao resfriamento e ao gerenciamento de combustíveis usados. Posteriormente, no Brasil, também é empregado o armazenamento a seco, realizado em unidades específicas fora das usinas, conhecidas como Unidades de Armazenamento a Seco – UAS (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

#### 3.2.4 Aspectos ligados à segurança

Para a expansão da energia nuclear em larga escala, tanto no Brasil quanto em outros países, é essencial que os sistemas sejam projetados de maneira a garantir margens de segurança adequadas durante a operação normal e em eventuais variações controladas. Dessa forma, a ocorrência de falhas graves pode ser evitada, e situações atípicas não resultarão em danos severos, como a fusão do núcleo do reator. O aprimoramento contínuo desses sistemas é um requisito fundamental para garantir a confiabilidade dessa fonte de energia (Souza, 2022).

O desastre ocorrido em Chernobyl, apesar de suas severas consequências ambientais, sociais e econômicas, impulsionou o avanço significativo das normas de segurança aplicadas à indústria nuclear. Como resultado, os reatores mais modernos, pertencentes às gerações III, III+ e IV, incorporaram melhorias substanciais em seus mecanismos de controle e proteção. Com a crescente globalização e a competitividade entre as empresas do setor, a inovação tecnológica tem desempenhado um papel fundamental na atualização das regulamentações, tornando-as cada vez mais rigorosas e eficazes na prevenção de incidentes (Machado, 2021).

Atualmente, a segurança operacional das usinas nucleares exige uma estrutura regulatória robusta, um gerenciamento eficiente e profissionais altamente qualificados (Moura, 2022). Dessa forma, nota-se que o desenvolvimento de novos sistemas nucleares prioriza a ampliação da confiabilidade e a minimização de riscos, assegurando um controle mais eficaz de possíveis incidentes e reduzindo os impactos de eventuais falhas (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

As diretrizes para a segurança e confiabilidade dessas instalações incluem

uma operação estável, estratégias aprimoradas para gestão de acidentes e a proteção do investimento, além da redução da necessidade de intervenções emergenciais que possam se estender para além do perímetro da usina (Murayama; Schmid, 2021). Além disso, a ampliação do uso da energia nuclear depende, também, da aceitação social dessa tecnologia (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

Questões como o gerenciamento de resíduos radioativos, os protocolos de segurança e os custos envolvidos são fatores determinantes na percepção pública sobre essa fonte energética (Machado; Hansen, 2018). Dessa maneira, entende-se que o avanço tecnológico tem o potencial de mitigar essas preocupações, promovendo a redução de custos operacionais, a implementação de sistemas mais seguros e a melhoria no descarte de rejeitos nucleares (Archila; Campos, 2021).

A educação e a disseminação de informações sobre os impactos ambientais do uso de combustíveis fósseis e a relação direta entre esses recursos e a emissão de gases de efeito estufa podem favorecer a compreensão da necessidade de fontes de energia livres de emissões. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021, disponível em *ClientEarth*) afirma que as emissões oriundas de combustíveis fósseis constituem a principal causa do aquecimento global.

Já segundo a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística de São Paulo (SEMIL, 2023), o dióxido de carbono gerado pela queima de combustíveis fósseis é o principal gás de efeito estufa associado às atividades humanas. Além disso, o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2020) registra que o nível de dióxido de carbono na atmosfera aumentou aproximadamente 35% desde a era industrial, em grande parte devido à queima de combustíveis fósseis e às mudanças no uso da terra.

#### 3.2.4.1 Normas, segurança e proteção nas usinas nucleares de Angra

As usinas nucleares de Angra 1, 2 e 3 foram projetadas para suportar eventos externos extremos, como terremotos, enchentes, tornados, incêndios e até impactos de aeronaves. Para garantir a máxima segurança, esses complexos contam com sistemas estruturais e operacionais fundamentados em redundância, diversidade e independência, que buscam minimizar os efeitos de ameaças internas e externas. Esses princípios integram o conceito de defesa em profundidade, amplamente adotado no setor nuclear como estratégia essencial para assegurar múltiplas barreiras de proteção (Machado; Hansen, 2018).

No Brasil, desde 1973, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabeleceu normas rigorosas para a operação dessas instalações, abrangendo diretrizes específicas para a segurança nuclear (Machado; Hansen, 2018). Atualmente, a atualização dessas regulamentações, conhecidas como salvaguardas, e o avanço nos estudos sobre reatores de geração III+ têm contribuído para transformar a percepção pública sobre o uso da energia nuclear no país. As normas estabelecem diretrizes para o licenciamento das instalações, elaboração de relatórios de segurança, monitoramento contínuo da saúde dos trabalhadores do setor, avaliação do desempenho operacional das usinas e critérios para manutenção das instalações (Murayama; Schmid, 2021).

Também determinam as exigências para a escolha de locais adequados para a construção de novas usinas, garantindo que esses projetos sejam desenvolvidos com sistemas de proteção ainda mais robustos e transparentes. Assim, os protocolos de radioproteção adotados no setor são baseados em três princípios fundamentais. O Princípio da Justificação estabelece que qualquer atividade que envolva radiação deve ser analisada em relação a alternativas disponíveis, garantindo que seus benefícios para a sociedade superem os riscos (Camelo, 2017).

O Princípio da Otimização prevê que a exposição à radiação deve ser mantida no menor nível possível, considerando aspectos sociais e econômicos, com o objetivo de reduzir tanto a intensidade das doses individuais quanto o número de pessoas expostas. Já o Princípio da Limitação, também chamado de Princípio da Dose Individual, impõe limites anuais de exposição à radiação, restringindo a dose máxima para trabalhadores do setor a 50 milisieverts e para a população que vive nas proximidades das instalações nucleares a 1 milisievert (Guimarães, 2015).

Dentro das usinas de Angra 1, 2 e 3, a segurança estrutural é garantida por um sistema de múltiplas barreiras físicas em torno do reator, composto por seis camadas de proteção: a estrutura cristalina das pastilhas de zircaloy, o revestimento das varetas de combustível, os sistemas herméticos de refrigeração do reator, a blindagem de concreto, a contenção esférica de aço e o prédio de concreto que abriga o reator. Além dessas proteções físicas, as usinas contam com sistemas de segurança passivos, incluindo a defesa em profundidade, que atua por meio de camadas sucessivas de proteção nos sistemas operacionais, dispositivos de segurança e mecanismos de monitoramento e controle dos reatores PWR (Souza, 2022).



Esses sistemas são projetados para entrar automaticamente em operação em caso de emergência, garantindo o desligamento do reator e seu resfriamento seguro quando necessário.

#### 3.2.4.2 Inovações tecnológicas e gestão da segurança na operação de usinas nucleares

A operação das usinas nucleares exige alto nível de controle, tanto para garantir a eficiência da geração de energia quanto para assegurar a segurança do sistema. O monitoramento contínuo das instalações ocorre por meio das centrais de controle, onde operadores acompanham, em tempo real, uma grande quantidade de dados técnicos provenientes das medições realizadas nos diversos sistemas da usina. No entanto, o elevado volume de informações requer um tempo considerável para análise e interpretação, o que pode retardar a tomada de decisões em situações que exigem respostas imediatas (Souza, 2022).

Para tornar o monitoramento mais eficiente e aprimorar a segurança das operações, foi desenvolvido o Sistema de Identificação e Classificação de Transientes (SICT). Esse mecanismo tem a função de interpretar os dados coletados na usina e prever a possibilidade de alterações operacionais que possam levar a estados instáveis, conhecidos como transientes. Dessa forma, os operadores recebem alertas antecipados e podem agir rapidamente para evitar condições adversas (Machado, 2021).

Outra inovação que contribui para o aumento da segurança e eficiência nas instalações nucleares é o uso de nanofluidos, especialmente os que contêm nanopartículas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Esses materiais apresentam propriedades superiores de troca térmica em comparação à água convencionalmente utilizada nos sistemas de resfriamento dos reatores. Como resultado, possibilitam um melhor controle da temperatura do combustível nuclear, reduzindo riscos operacionais e aumentando a eficiência energética das usinas (Camelo, 2017).

Além disso, métodos avançados de otimização vêm sendo aplicados para aperfeiçoar a gestão do combustível nuclear. O Otimização do Enxame de Partículas (OEP) é um sistema baseado em algoritmos que auxilia na complexa tarefa de recarga dos reatores do tipo PWR. Esse método permite analisar múltiplas combinações de disposição das pastilhas de combustível, identificando as configurações mais seguras e eficientes para garantir o desempenho ideal da usina

ao longo dos ciclos de operação (Jerônimo, 2023).

No cenário internacional, diversas estratégias vêm sendo adotadas para o armazenamento seguro dos resíduos nucleares. Na Finlândia, o depósito subterrâneo de Onkalo foi projetado para armazenar, em segurança, os combustíveis irradiados ao longo dos últimos 50 anos, além dos rejeitos que ainda serão produzidos até 2120. O material descartado será depositado em túneis a 450 metros de profundidade, onde será isolado com camadas de argila, cimento e revestimentos de cobre, garantindo a contenção segura dos resíduos e prevenindo impactos ambientais e riscos à saúde da população (Guimarães, 2015).

Essas novas tecnologias permitirão um uso mais eficiente do urânio, diminuirão a quantidade de rejeitos nucleares gerados e integrarão sistemas de segurança passivos, aumentando a resistência a incidentes e reduzindo os riscos de proliferação nuclear. Além da produção de eletricidade, esses reatores poderão ser empregados em outras aplicações industriais, ampliando o escopo da energia nuclear (Archila; Campos, 2021).

Por fim, melhorias nos processos de comissionamento e descomissionamento das usinas facilitarão sua construção e desativação, tornando todo o ciclo operacional mais seguro e sustentável.

### 3.3 Aceitação pública e comunicação sobre a energia nuclear

A trajetória da energia nuclear no Brasil está diretamente ligada ao desenvolvimento de políticas públicas e estratégias governamentais que moldaram o setor ao longo das décadas. Desde a implementação do Programa Nuclear Brasileiro, diversas iniciativas foram adotadas para consolidar essa tecnologia como parte da matriz energética nacional. No entanto, a aceitação pública da energia nuclear ainda representa um desafio, visto que fatores históricos, políticos e sociais influenciam a percepção da sociedade sobre seus riscos e benefícios (Moura, 2022).

Assim, o debate acerca da universalização do acesso à eletricidade gerada por fontes nucleares enfrenta resistências que vão desde preocupações ambientais até o temor de acidentes, o que demanda um planejamento estratégico para ampliar a compreensão da população sobre os avanços tecnológicos e os altos padrões de segurança adotados nas usinas. Para fortalecer essa aceitação, um plano de ação focado em transparência, regulamentação e divulgação científica tem sido estudado, aliado a uma comunicação mais eficaz entre o setor nuclear e a sociedade (Souza;

Lima, 2019).

A maneira como o público percebe a energia nuclear está diretamente relacionada à forma como as informações são transmitidas, tornando essencial o investimento em estratégias que tornem o tema mais acessível e compreensível para diferentes segmentos da população. Essas questões serão esclarecidas neste tópico.

### 3.3.1 Evolução e fundamentos da Política Nuclear Brasileira

O Programa Nuclear Brasileiro tem suas origens no período pós-Segunda Guerra Mundial, quando o país iniciou esforços para desenvolver tecnologia nuclear com fins pacíficos. A política nuclear brasileira foi estruturada a partir de acordos internacionais e iniciativas governamentais voltadas para a independência energética, segurança nacional e avanço científico (Machado; Hansen, 2018).

Ao longo das décadas, o setor passou por diferentes fases, incluindo parcerias estratégicas, investimentos na construção de usinas e desafios relacionados à regulação e aceitação pública. Assim, as bases da política nuclear foram estabelecidas com foco na pesquisa, no domínio do ciclo do combustível e na ampliação da geração de eletricidade por meio de reatores nacionais (Camelo, 2017).

Esse planejamento buscou garantir a soberania do Brasil na área nuclear, resultando na criação de instituições como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e no desenvolvimento de infraestrutura para enriquecimento de urânio e produção de radioisótopos. Embora tenha enfrentado períodos de estagnação e revisões estratégicas, o programa continua sendo um pilar fundamental da política energética do país, como será demonstrado neste tópico.

#### 3.3.1.1 A evolução da Política Nuclear Brasileira: diretrizes, projetos e desafios

O Programa Nuclear Brasileiro teve seu início nos anos 1950, mas, por décadas, não contou com um planejamento estruturado ou metas claramente definidas. Desde a criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear, responsável pela regulação das atividades nucleares no país, as iniciativas do setor foram fragmentadas e marcadas por descontinuidade. Somente com a formalização da política nuclear por meio de um decreto, o Brasil passou a consolidar diretrizes voltadas para o desenvolvimento tecnológico, segurança energética e ampliação do uso da energia nuclear na matriz elétrica nacional (Ferreira, 2023).

O país possui uma das maiores reservas de urânio do mundo, além de usinas em operação que representam uma parcela significativa da geração de eletricidade. Contudo, a construção de novas usinas, como Angra 3, enfrenta desafios desde 2015, quando foi interrompida. A necessidade de reestruturação do setor nuclear levou à formulação de uma política mais abrangente, com o objetivo de coordenar ações estratégicas, garantir a proteção ambiental e promover o uso pacífico da tecnologia nuclear (Souza, 2022).

Nesse contexto, a política nuclear brasileira foi estabelecida para orientar o planejamento e as ações do setor, considerando princípios como o domínio da tecnologia nuclear, a segurança radiológica e a conformidade com tratados internacionais. O Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro desempenhou um papel fundamental na elaboração dessas diretrizes, promovendo maior integração e eficiência nas decisões governamentais (Moura, 2022).

Entre os principais projetos inseridos nesse contexto estão o Programa do Submarino Nuclear Brasileiro, que reforça a defesa estratégica do país; o Reator Multipropósito Brasileiro, voltado para ampliar a autonomia na produção de radioisótopos; e a construção da Usina Nuclear de Angra 3, cujo objetivo é expandir a capacidade de geração de energia. Esses projetos refletem os esforços do Brasil para consolidar sua independência tecnológica e fortalecer sua infraestrutura nuclear (Souza; Lima, 2019).

Dessa maneira, a política nuclear brasileira estabelece diretrizes que incluem a busca pela autonomia no desenvolvimento do setor, a cooperação internacional para o uso pacífico da energia nuclear, o incentivo à produção nacional de minérios nucleares e a promoção da sustentabilidade econômica dos projetos. Além disso, a regulamentação do setor visa garantir a segurança da população e a preservação ambiental, alinhando-se às melhores práticas globais (Moura, 2022).

Essa estrutura também contempla objetivos como a preservação do domínio da tecnologia nuclear, a ampliação do uso da energia nuclear na matriz elétrica, a modernização da infraestrutura do setor e o incentivo à pesquisa e inovação (Takahashi; Taveira; Correa, 2021). A formação e qualificação de profissionais especializados são aspectos essenciais para assegurar a continuidade e a evolução do setor nuclear no Brasil (Murayama; Schmid, 2021).

O governo tem implementado ações para ampliar a geração de energia nuclear e garantir a continuidade dos projetos em andamento. Após décadas de

desafios e avanços isolados, o programa passa a operar sob uma coordenação mais estruturada, permitindo maior eficiência e previsibilidade nas decisões. Além disso, medidas voltadas à regulação da exploração de urânio e ao estímulo da exportação desse recurso buscam fortalecer a competitividade da indústria nuclear brasileira (Bastos; Moraes, 2019).

Com um conjunto de diretrizes bem estabelecidas, a política nuclear brasileira busca consolidar a energia nuclear como um elemento essencial da matriz energética nacional. Nesse contexto, frisa-se que o uso dessa tecnologia não se limita apenas à geração de eletricidade, mas também se estende a áreas estratégicas como a defesa nacional, a medicina nuclear e a pesquisa científica, reforçando seu papel no desenvolvimento tecnológico e econômico do país (Souza, 2022).

### 3.3.1.2 Fundamentos da Política Nuclear Brasileira: estrutura, diretrizes e desafios

Ao longo da história do setor nuclear brasileiro, a falta de continuidade nos projetos tem sido um dos principais desafios para a consolidação de uma política nacional eficiente. Um estudo elaborado para a Secretaria de Assuntos Estratégicos identificou essa descontinuidade como um obstáculo central para o avanço do programa nuclear no país, evidenciando vulnerabilidades que comprometem a expansão e a consolidação dessa matriz energética (Machado; Hansen, 2018).

Inicialmente, os planos do Brasil previam o desenvolvimento de reatores próprios, porém, optou-se pela aquisição de tecnologia estrangeira. Um exemplo marcante foi a compra de um reator norte-americano, em vez do desenvolvimento de uma tecnologia nacional. Além disso, o acordo firmado entre Brasil e Alemanha previa a construção de nove centrais nucleares, um compromisso que acabou não sendo cumprido integralmente, resultando na necessidade de reavaliação das estratégias adotadas (Murayama; Schmid, 2021).

Diante do não cumprimento integral do acordo bilateral, foi criado o Programa Autônomo, também chamado de Programa Paralelo, cujo objetivo era garantir o domínio de todas as etapas do ciclo do combustível nuclear, incluindo o enriquecimento de urânio. No entanto, essa iniciativa foi interrompida durante o governo Collor. Apesar disso, alguns avanços foram incorporados ao programa da Marinha, que passou a coordenar o desenvolvimento do enriquecimento do urânio, em cooperação com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (Archila; Campos,

2021).

A trajetória da energia nuclear no Brasil é marcada por sucessivas interrupções, como ocorreu com a construção de Angra 2, que ficou paralisada por anos antes de ser retomada e concluída. Situação semelhante ocorreu com Angra 3, cuja obra foi iniciada, interrompida e, posteriormente, retomada. Até mesmo o projeto do submarino nuclear perdeu prioridade por determinado período. Essa descontinuidade compromete não apenas o andamento dos empreendimentos, mas afeta toda a cadeia produtiva e tecnológica do setor, dificultando investimentos de longo prazo e atrasando a consolidação de uma política energética eficiente.

Dessa maneira, ressalta-se que os projetos nucleares exigem planejamento de longo prazo, uma vez que seu desenvolvimento ultrapassa os ciclos políticos de um ou dois mandatos presidenciais. Dessa forma, nota-se que a continuidade das iniciativas demanda uma política de Estado que garanta previsibilidade e estabilidade para o setor. Sem esse compromisso institucional, a implementação de novas usinas e a ampliação da infraestrutura nuclear ficam constantemente ameaçadas por mudanças de governo e revisões orçamentárias (Bastos; Moraes, 2019).

Em 2016, a reestruturação da governança do setor nuclear resultou na transferência da Coordenação de Assuntos Estratégicos para o Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República. Essa decisão garantiu a manutenção dos trabalhos iniciados na Secretaria de Assuntos Estratégicos e, em alguns casos, possibilitou sua ampliação. Essa ação foi amplamente elogiada por representar um raro exemplo de continuidade no setor nuclear, reforçando a necessidade de políticas que ultrapassem gestões específicas e garantam o cumprimento dos objetivos estratégicos de longo prazo (Camelo, 2017).

Mesmo com a mudança de governo, algumas diretrizes foram mantidas pelo Ministério de Minas e Energia, demonstrando que, em determinados casos, a política nuclear pode ser tratada com o compromisso necessário para sua efetiva implementação. A formação de grupos de trabalho e o estabelecimento de metas mais detalhadas são medidas fundamentais para assegurar o avanço desse setor no Brasil, permitindo que a energia nuclear se consolide como uma alternativa viável e segura para o fornecimento de eletricidade no país (Souza, 2022).

### 3.3.2 Desafios e percepções: a aceitação social da energia nuclear na universalização do acesso à eletricidade

A aceitação social da energia nuclear representa um desafio central na busca pela universalização do acesso à eletricidade, especialmente em países emergentes como o Brasil. O fornecimento de energia em larga escala está diretamente ligado a indicadores de desenvolvimento humano, influenciando a qualidade de vida da população, a estabilidade econômica e a preservação ambiental. No entanto, a aceitação da energia nuclear, apesar de agregar benefícios como a elevada eficiência e baixa emissão de carbono, enfrenta grande resistência, pois a sua popularização é desencorajada devido à propagação de desinformação e à memória desses indivíduos sobre desastres passados (Archila; Campos, 2021).

A principal barreira à aceitação dessa tecnologia reside no medo enraizado na sociedade, que se intensificou após os acidentes de Chernobyl e Fukushima. Esses eventos consolidaram a imagem da energia nuclear como um risco significativo, ainda que avanços tecnológicos e medidas rigorosas de segurança tenham reduzido drasticamente as probabilidades de falhas catastróficas. Paralelamente, a ausência de uma comunicação eficaz entre governo, indústria e sociedade agrava essa desconfiança, dificultando a construção de um consenso favorável à ampliação da energia nuclear como fonte sustentável (Moura, 2022).

Além dos temores relacionados a acidentes, a questão do descarte de resíduos radioativos também reforça a rejeição pública. A falta de conhecimento sobre os métodos modernos de armazenamento seguro e reaproveitamento dos rejeitos contribui para a resistência à expansão desse modelo energético (Murayama; Schmid, 2021). No entanto, experiências internacionais demonstram que a gestão adequada dos resíduos nucleares já é uma realidade consolidada, com soluções eficazes em países como Finlândia e França (Guimarães, 2015).

A dependência de fontes energéticas tradicionais e altamente poluentes, como o carvão e o petróleo, levanta questionamentos sobre a coerência da oposição à energia nuclear (Takahashi; Taveira; Correa, 2021). Enquanto as usinas termelétricas emitem grandes quantidades de gases do efeito estufa e demandam elevados custos ambientais, a energia nuclear oferece uma alternativa viável para suprir a crescente demanda por eletricidade sem comprometer os compromissos globais de redução de carbono (Archila; Campos, 2021).

No entanto, para que essa alternativa seja amplamente aceita, é fundamental

que haja uma mudança na percepção pública, promovida por iniciativas de conscientização e educação sobre o real impacto da tecnologia nuclear. O Brasil, detentor de uma das maiores reservas de urânio do mundo, enfrenta o dilema entre explorar esse potencial e lidar com a resistência social. A desinformação e a falta de um debate transparente impedem a evolução de um programa nuclear consolidado, tornando essencial o investimento em estratégias de comunicação que esclareçam à população os benefícios e desafios dessa fonte energética (Camelo, 2017).

Para isso, é necessário adotar políticas que incentivem um diálogo aberto e acessível, desmistificando mitos e apresentando dados concretos sobre a segurança e eficiência da energia nuclear (Souza; Lima, 2019).

A universalização do acesso à eletricidade, especialmente diante das projeções de crescimento populacional e da necessidade de ampliar a capacidade de geração de energia, exige uma abordagem pragmática e baseada em evidências. O medo do desconhecido não pode ser o único fator determinante na formulação de políticas energéticas. A aceitação social da energia nuclear deve ser construída com base na transparência, no esclarecimento técnico e na conscientização sobre seu papel no desenvolvimento sustentável e na segurança energética das futuras gerações (Ferreira, 2023).

### 3.3.3 Desafios da aceitação pública da energia nuclear no Brasil: histórico, percepções e perspectivas

A aceitação pública da energia nuclear tem sido um dos principais desafios para sua expansão, tanto no Brasil quanto no cenário global. Apesar de sua eficiência energética e do potencial para contribuir significativamente com a matriz elétrica de diversos países, o histórico da energia nuclear está profundamente marcado por eventos que suscitam medo e resistência na população. A relação entre a sociedade e essa fonte energética é permeada por episódios históricos que, ao longo das décadas, influenciaram a percepção pública e moldaram as políticas de comunicação e regulação do setor (Ferreira, 2023).

A origem do temor social em relação à energia nuclear está, em grande parte, associada ao uso bélico da tecnologia. A explosão das bombas atômicas sobre Hiroshima e Nagasaki, em 1945, demonstrou ao mundo o enorme poder destrutivo da fissão nuclear (Souza; Lima, 2019). Esse impacto negativo foi reforçado pelos acidentes nucleares que ocorreram posteriormente, como os de Three Mile Island



(EUA – 1979), Chernobyl (Ucrânia – 1986), Goiânia (Brasil – 1987) e Fukushima (Japão – 2011) (Camelo, 2017).

Esses eventos, amplamente divulgados e discutidos na sociedade global conectada, fortaleceram uma narrativa de risco e perigo em torno da tecnologia nuclear. A percepção de insegurança, alimentada por esses episódios, contribuiu para a rejeição social à energia nuclear, tornando seu avanço dependente de estratégias eficazes de comunicação e políticas de mitigação de riscos. Todavia, no Brasil, a aceitação da energia nuclear enfrenta desafios específicos (Machado; Hansen, 2018).

Desde sua participação no Projeto Manhattan, entre 1943 e 1950, o país esteve envolvido em iniciativas que buscavam desenvolver e explorar o potencial nuclear. Contudo, a falta de transparência e a dualidade entre os programas civis e militares ao longo das décadas contribuíram para a desconfiança pública. Durante o período da ditadura militar (1964-1985), por exemplo, o Brasil desenvolveu um programa nuclear paralelo, mantendo projetos secretos que geraram suspeitas e reforçaram uma percepção de falta de controle sobre o setor (Takahashi; Taveira; Correa, 2021).

Esse histórico de sigilo e controvérsias comprometeu a confiança da população na energia nuclear como uma alternativa segura e viável para a matriz elétrica nacional. A corrupção e os escândalos políticos também desempenharam um papel significativo na resistência pública à energia nuclear no Brasil. O impacto desse episódio na opinião pública foi severo, uma vez que reforçou a visão de que o setor nuclear no Brasil estava sujeito a irregularidades e falta de transparência. Com isso, o apoio popular a novas usinas nucleares foi prejudicado, e o avanço do setor tornou-se ainda mais difícil. Outro aspecto relevante para a aceitação pública da energia nuclear é a comunicação com a sociedade. Em muitos países, a falta de informação clara e acessível sobre o funcionamento e os benefícios da energia nuclear contribui para a perpetuação de mitos e medos infundados (Bastos; Moraes, 2019).

O Brasil não foge dessa realidade. A ausência de campanhas educativas eficazes e de um diálogo transparente entre governo, setor nuclear e sociedade faz com que parte da população tenha uma visão distorcida sobre os riscos e vantagens da energia nuclear. Enquanto fontes como a energia hidrelétrica e as renováveis, como solar e eólica, são mais bem aceitas, a nuclear ainda sofre com o estigma do

perigo e da contaminação radioativa (Murayama; Schmid, 2021).

No entanto, em um contexto de crescente demanda por eletricidade e necessidade de transição para fontes de energia de baixa emissão de carbono, a energia nuclear surge como uma alternativa importante (Machado, 2021). Para reverter esse cenário, torna-se essencial investir em estratégias de comunicação que esclareçam a população sobre os avanços na segurança das usinas nucleares e os benefícios da energia nuclear em termos de estabilidade energética e redução de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a aceitação pública da energia nuclear também está relacionada ao contexto político e econômico.

Nos últimos anos, o Brasil anunciou planos para expandir sua capacidade nuclear, incluindo a construção de novas usinas (Moura, 2022). No entanto, a viabilização desses projetos depende não apenas de investimentos e infraestrutura, mas também da superação das barreiras sociais. A desconfiança da população pode impactar diretamente o avanço de políticas nucleares, tornando fundamental que o governo e as instituições do setor adotem práticas mais transparentes e dialoguem de maneira mais eficaz com a sociedade. Assim, a comparação com outros países pode fornecer insights importantes para a aceitação da energia nuclear no Brasil (Jerônimo, 2023).

Por fim, a questão da aceitação pública da energia nuclear não pode ser dissociada da necessidade de um debate qualificado e bem informado sobre a matriz energética do país. Assim, pode-se concluir que a resistência social à energia nuclear, muitas vezes baseada no medo e na falta de conhecimento técnico, precisa ser enfrentada com estratégias de comunicação eficazes, transparência na gestão do setor e investimentos contínuos em segurança (Murayama; Schmid, 2021).

O desenvolvimento sustentável e a busca por uma matriz energética equilibrada exigem que todas as fontes de energia sejam consideradas com base em dados técnicos e científicos, e não apenas em percepções subjetivas. Dessa forma, a energia nuclear pode ser vista como parte da solução para os desafios energéticos do Brasil, desde que haja um esforço conjunto para fortalecer a confiança pública e garantir um uso seguro e eficiente dessa tecnologia.

## 4. Metodologia

### 4.1 Metodologia Qualitativa e Categorias de Análise

Este trabalho foi desenvolvido com base em uma abordagem qualitativa de caráter exploratório e descritivo, fundamentada na análise documental e interpretativa. O objetivo central da metodologia foi compreender os fatores técnicos, econômicos, institucionais e sociais envolvidos na conclusão da Usina Nuclear de Angra 3, bem como analisar os desafios relacionados à aceitação pública da energia nuclear no Brasil.

Para tanto, foram coletadas e examinadas fontes secundárias relevantes, como documentos institucionais, planos governamentais (a exemplo do Plano Nacional de Energia 2050), relatórios técnicos, reportagens jornalísticas, artigos acadêmicos e publicações especializadas. A análise foi orientada pela construção de três grandes categorias temáticas:

- I. Aspectos técnicos e operacionais da energia nuclear no Brasil, envolvendo o ciclo do combustível, o funcionamento das usinas, os avanços tecnológicos e os parâmetros de segurança adotados no setor;
- II. Viabilidade econômica da conclusão de Angra 3, com foco em indicadores financeiros e energéticos como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback e Custo Nivelado de Energia (LCOE);
- III. Comunicação institucional e aceitação pública, abordando a percepção social, os desafios históricos de imagem da energia nuclear e as estratégias adotadas no Brasil e em outros países para ampliar a legitimidade da tecnologia junto à sociedade.

Os critérios de análise interpretativa incluíram: (i) a frequência e recorrência temática nas fontes analisadas; (ii) a convergência ou divergência de posicionamentos entre os documentos; (iii) o grau de profundidade dos argumentos apresentados; e (iv) a relação entre o conteúdo analisado e os objetivos do estudo. O cruzamento desses critérios permitiu construir uma compreensão crítica e integrada dos fatores que envolvem o debate sobre a energia nuclear e a conclusão de Angra 3 no Brasil.

Adicionalmente, os indicadores econômicos aplicados no estudo de caso serviram como instrumento de avaliação da viabilidade financeira da retomada das

obras de Angra 3, contribuindo para uma análise mais concreta e quantitativa das implicações desse empreendimento para a matriz elétrica nacional.

Por fim, reconhece-se que, por não ter realizado entrevistas, questionários ou outras técnicas de coleta direta, este trabalho apresenta limitações no que diz respeito à captação de percepções sociais em primeira mão. A análise da aceitação pública foi conduzida com base em documentos e reportagens, o que restringe a profundidade da compreensão subjetiva dos atores sociais envolvidos. Essa limitação, no entanto, abre espaço para futuras investigações que pretendam avançar na escuta direta da população, especialmente das comunidades impactadas por empreendimentos nucleares, contribuindo para uma avaliação ainda mais completa do tema.

#### 4.2 Análise Econômica Aplicada ao Estudo de Caso

Complementando a análise qualitativa, este trabalho incorpora uma abordagem quantitativa aplicada à avaliação da viabilidade econômica da conclusão de Angra 3. Foram utilizados indicadores clássicos de análise de investimentos: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o período de retorno (payback) e o Custo Nivelado de Energia (LCOE). A adoção desses indicadores visa quantificar o retorno financeiro esperado, o risco e a competitividade da usina em relação a outras fontes energéticas.

##### 4.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL representa o valor atual dos fluxos de caixa futuros descontados a uma taxa de referência, subtraído do investimento inicial. A fórmula utilizada é:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I_0$$

(Equação 1)

Onde:

- $F_t$  = Fluxo de caixa no ano  $t$
- $i$  = Taxa de desconto anual
- $n$  = Período de análise
- $I_0$  = Investimento inicial

#### 4.2.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa que iguala o VPL a zero, indicando a rentabilidade esperada do projeto. O resultado estimado para Angra 3 foi uma TIR de 27% ao ano, significativamente superior à taxa de desconto utilizada.

#### 4.2.3 Payback

O payback simples foi obtido pela razão entre o investimento inicial e a receita líquida anual projetada. Esse número indica que o retorno do investimento pode ser alcançado em menos de três anos de operação plena.

#### 4.2.4 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

O LCOE permite comparar o custo médio de geração de energia ao longo da vida útil da usina com outras fontes. Sua fórmula é:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n (I_t + M_t + F_t)}{\sum_{t=0}^n E_t}$$

(Equação 2)

Onde:

- $I_t$  = Investimento de capital no ano
- $M_t$  = custo de operação e manutenção
- $F_t$  = custo com combustível
- $E_t$  = energia gerada no ano.

A tarifa atualizada de R\$653,31/MWh foi utilizada como parâmetro de referência, associada a uma produção anual de 12 milhões de MWh.

Ao integrar essas dimensões qualitativas e quantitativas, a metodologia adotada busca oferecer uma análise abrangente, técnica e interpretativa do caso Angra 3, apoiando-se em evidências documentais, fundamentos econômicos e critérios sociais relevantes.

### 5. Estudo de caso: Angra 3 e os Desafios da Aceitação Pública

#### 5.1 Contextualização do Projeto Angra 3

A conclusão da usina vinculada ao Projeto Angra 3 é considerada estratégica pelo Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), que prevê a ampliação da participação da energia nuclear na matriz elétrica brasileira como forma de garantir

segurança energética, reduzir a dependência de fontes hídricas e mitigar emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a usina possui relevante impacto socioeconômico local, gerando empregos diretos e indiretos, movimentando a economia regional e contribuindo para a arrecadação de tributos municipais.

No entanto, a retomada do projeto enfrenta desafios que vão além do campo técnico-financeiro. A resistência de setores da sociedade, alimentada por preocupações com segurança, impactos ambientais e custos envolvidos, revela a necessidade de um debate mais transparente e acessível sobre os reais benefícios e riscos da energia nuclear. Nesse sentido, compreender a aceitação pública em relação à conclusão de Angra 3 torna-se essencial para o êxito do empreendimento.

## 5.2 Controvérsias Institucionais e Políticas

O projeto de Angra 3 também se insere em um cenário de disputas institucionais e interesses políticos que influenciam diretamente o ritmo, a viabilidade e a condução do empreendimento. Matéria publicada no site Petronotícias sugere que existem movimentos internos, inclusive dentro do próprio governo, que visam inviabilizar a continuidade do projeto. Esses movimentos seriam motivados por pressões contrárias à energia nuclear ou por disputas em torno do controle e da gestão do setor elétrico.

A complexidade institucional é ampliada pela reestruturação da Eletrobras e pela tentativa de atrair capital privado para a conclusão da usina. A Eletronuclear, responsável pela obra, passou a buscar soluções de mercado para financiar o restante do projeto, cortando despesas operacionais e sinalizando interesse em parcerias público-privadas. No entanto, ainda há incertezas quanto à governança do projeto e à estabilidade regulatória necessária para atrair investidores.

O CNPE, instância superior de decisão em política energética, é o órgão responsável por deliberar sobre a retomada ou não das obras. A indefinição sobre esse ponto, somada à falta de uma política clara para o setor nuclear, compromete a previsibilidade e afeta negativamente a imagem da energia nuclear junto à sociedade e ao mercado. Nesse sentido, a ausência de consenso institucional e o embate político fragilizam a condução estratégica de um projeto que exige estabilidade e comprometimento de longo prazo.

### 5.3 Análise Econômica da Conclusão de Angra 3

A discussão sobre a conclusão de Angra 3 gira em torno de um dilema central: continuar investindo em um projeto de elevado custo ou abandonar definitivamente a obra, assumindo prejuízos imediatos e estruturais. A manutenção do canteiro de obras inativo, mesmo sem geração de energia, custa aproximadamente R\$1 bilhão por ano aos cofres públicos, valor este destinado à conservação de equipamentos, segurança e manutenção do acervo técnico da usina (POLÍTICA BRASILEIRA, 2025).

Por outro lado, os investimentos realizados até o momento ultrapassam R\$10 bilhões, e o custo estimado para a finalização do projeto gira em torno de R\$17 bilhões, de acordo com informações da Eletronuclear. Considerando a atualização monetária com base no IPCA acumulado entre 2021 e 2025 (cerca de 17%), o custo corrigido da conclusão alcança aproximadamente R\$28,75 bilhões (CORREIO BRAZILIENSE, 2024).

Segundo o Correio Braziliense (2024), a tarifa originalmente prevista para a energia gerada por Angra 3 será de R\$653,31/MWh. Mantida a estimativa de produção anual de 12 milhões de MWh, a receita bruta anual da usina seria de aproximadamente R\$7,8 bilhões. Esse montante, aliado à natureza contínua e confiável da geração nuclear, reforça a viabilidade financeira do projeto mesmo com uma tarifa superior à de fontes renováveis intermitentes. Vale destacar que usinas térmicas fósseis, além de apresentarem maior custo (superior a R\$850/MWh), também acarretam maiores impactos ambientais.

Estudos da Fundação Getúlio Vargas (FGV) reforçam os impactos positivos do setor nuclear na economia: cada R\$ 1 bilhão investido gera R\$ 3,1 bilhões em movimentação da cadeia produtiva e R\$ 2 bilhões no Produto Interno Bruto (PIB), além da criação de aproximadamente 22,5 mil empregos, com concentração significativa no estado do Rio de Janeiro. Isso evidencia o papel estratégico da usina não apenas na matriz energética, mas também no desenvolvimento econômico regional e nacional (FGV ENERGIA, 2024).

Com base nessas projeções de receita e nos custos atualizados, estima-se um período de retorno do investimento (payback) em cerca de quatro anos de operação plena. Essa perspectiva será detalhada nos subitens a seguir, por meio do uso de indicadores clássicos de análise de investimentos, como o Valor Presente

Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Custo Nivelado de Energia (LCOE). Esses instrumentos reforçam a análise de viabilidade econômica de Angra 3 com base em critérios técnicos robustos.

### 5.3.1 Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR)

Para aprofundar a análise econômica da viabilidade de Angra 3, foram aplicados os indicadores Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Assumindo um fluxo de receita líquida constante de R\$ 9,75 bilhões por ano durante 30 anos e um investimento inicial de R\$ 28,75 bilhões. O VPL é calculado pela fórmula:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - i_0$$

(Equação 3)

Onde:

- $F_t$  = Fluxo de caixa no ano  $t$  = R\$ 9,75 bilhões
- $i$  = Taxa de desconto anual = 10% (0,10)
- $n$  = Período de análise = 30 anos
- $I_0$  = Investimento inicial = R\$ 28,75 bilhões (valor corrigido pelo IPCA)

O resultado foi um VPL de aproximadamente R\$44,78 bilhões, o que significa que o projeto devolve, em valor presente, mais que o investimento realizado.

A TIR é a taxa  $r$  que torna o VPL igual a zero, ou seja, resolve:

$$0 = \sum_{t=1}^{30} \frac{9,75}{(1+r)^t} - 28,75 \rightarrow TIR \approx 27\% \text{ a. a.}$$

(Equação 4)

Os resultados demonstram que o projeto apresenta um retorno financeiro expressivo. A TIR está muito acima da taxa de desconto utilizada (10% a.a.), e o VPL positivo indica que a conclusão de Angra 3 representa uma alocação economicamente racional dos recursos públicos ou privados, consolidando sua viabilidade financeira no médio e longo prazo.

A escolha da taxa de desconto em estudos de viabilidade econômica varia conforme a instituição. O BNDES utilizou 9,25 % ao ano em análises de concessões



rodoviárias no Triângulo Mineiro e Sul de Minas (BNDES, 2021). A EPE, no Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, adotou uma taxa real de desconto de 8 % ao ano (EPE, 2015). Em âmbito internacional, o relatório IEA/NEA (2020) aplicou uma taxa uniforme de 7 % para cálculo do LCOE, enquanto edições anteriores também consideraram cenários de 3 %, 7 % e 10 % para comparações (IEA; NEA, 2020).

5.3.2 Análise Comparativa via LCOE entre Fontes Fósseis e Energia Nuclear

O Custo Nivelado de Energia (LCOE) é uma métrica amplamente adotada para comparar tecnologias de geração. Ele representa o custo médio por MWh gerado ao longo da vida útil da usina, incorporando investimento inicial, operação, manutenção, combustível e financiamento.

Segundo a IEA (2020), os valores médios de LCOE para diferentes tecnologias, considerando uma taxa de desconto de 10%, são:

Tabela 1 – Valores médios do Custo Nivelado de Energia (LCOE) para diferentes fontes energéticas com taxa de desconto de 10%

| Fonte de Energia   | LCOE (USD/MWh) |
|--------------------|----------------|
| Energia Nuclear    | 69             |
| Gás Natural (CCGT) | 74             |
| Carvão Pulverizado | 109            |

Fonte: OECD/IEA/NEA (2020, p. 15).

Esses dados revelam que, mesmo com um investimento inicial mais elevado, a energia nuclear possui um custo nivelado competitivo em relação às fontes fósseis, especialmente quando consideradas suas vantagens operacionais — como o alto fator de capacidade (acima de 90%), a geração contínua e a estabilidade tarifária.

No contexto brasileiro, a conclusão de Angra 3 tende a se beneficiar de características semelhantes. Com um custo projetado de R\$653,31/MWh e uma vida útil esperada de 30 anos, a projeção de custo nivelado da usina se alinha à média internacional. Esse perfil tarifário estável contribui para maior previsibilidade no planejamento energético de longo prazo.

Quando se incorporam externalidades ambientais associadas às emissões de gases de efeito estufa e aos impactos na saúde pública, verifica-se que os custos reais das fontes fósseis aumentam significativamente. De acordo com a IEA e a NEA (2020), o custo nivelado da eletricidade (LCOE) da energia nuclear apresenta relativa estabilidade mesmo sob diferentes cenários de precificação de carbono, ao contrário das termelétricas fósseis, cujo LCOE cresce substancialmente conforme se elevam os preços dos créditos de carbono, reduzindo sua competitividade frente às fontes de baixa emissão.

Portanto, a utilização do LCOE como métrica complementar reforça a robustez econômica da conclusão de Angra 3. Em conjunto com os indicadores de VPL e TIR, o LCOE contribui para demonstrar que o projeto não só oferece retorno financeiro direto, como também favorece a resiliência econômica e ambiental da matriz elétrica brasileira.

Para aprofundar essa avaliação, recomenda-se que estudos futuros explorem simulações com múltiplos cenários, como otimista, conservador e pessimista, incorporando diferentes premissas macroeconômicas, como taxa de desconto, inflação, variação cambial e custo de capital. Embora os resultados apresentados neste trabalho já indiquem uma viabilidade econômica sólida, tais simulações poderiam reforçar a compreensão da resiliência do projeto frente a condições adversas ou variáveis de longo prazo, sem comprometer o diagnóstico técnico-financeiro favorável aqui demonstrado.

#### 5.4 Cenários Econômico-Políticos: Retomar ou Abandonar?

A decisão de concluir ou abandonar o projeto Angra 3 envolve não apenas variáveis econômicas, mas também institucionais, políticas e sociais. De um lado, a retomada da construção exige comprometimento político, estabilidade regulatória e articulação institucional para garantir a continuidade do empreendimento e a atração de investimentos. De outro, o abandono implicaria perdas significativas que ultrapassam os valores financeiros imediatos.

Segundo o Correio Braziliense (2024), um estudo técnico do BNDES apontou que o abandono da construção de Angra 3 custaria aproximadamente R\$ 21 bilhões, valor muito próximo dos R\$ 23 bilhões necessários para concluir a obra. Esse montante inclui quitação de dívidas (R\$ 9,2 bilhões), rescisões contratuais (R\$ 2,5 bilhões), devolução de incentivos fiscais (R\$ 1,1 bilhão), desmobilização da obra (R\$

940 milhões) e custo de oportunidade do capital já investido (R\$ 7,3 bilhões). Essas despesas resultariam em um prejuízo imediato para o setor público sem nenhuma contrapartida energética ou social. (CORREIO BRAZILIENSE, 2024).

Adicionalmente, essa decisão comprometeria a credibilidade do setor nuclear brasileiro, dificultaria a atração de novos projetos estratégicos e impactaria negativamente a imagem institucional do país no cenário internacional. Também haveria retrocesso na agenda de transição energética, uma vez que Angra 3 representa uma importante alternativa de base com baixa emissão de carbono.

Por outro lado, a conclusão do projeto apresenta-se como uma solução de médio e longo prazo para a segurança energética nacional. Além de reduzir a dependência de fontes intermitentes e de combustíveis fósseis, Angra 3 fortalece a capacidade instalada do sistema elétrico e potencializa o desenvolvimento tecnológico da indústria nuclear brasileira. Com retorno financeiro robusto — VPL de R\$44,78 bilhões e TIR de 27% ao ano —, a decisão de concluir a usina se alinha às melhores práticas de política pública e à racionalidade econômica de longo prazo.

Em síntese, o cenário de abandono representa não apenas uma perda econômica, mas também um enfraquecimento institucional. Já o cenário de retomada indica uma oportunidade estratégica de desenvolvimento, diversificação da matriz energética e avanço tecnológico. A escolha entre esses caminhos exige não apenas análise técnica, mas também visão de Estado e compromisso com o futuro energético e ambiental do Brasil.

### 5.5 Análise da Aceitação Pública a partir de Documentos e Reportagens

A análise de documentos técnicos, reportagens e notas institucionais revela que a aceitação pública da energia nuclear — e, em especial, de Angra 3 — continua sendo um dos maiores desafios para a consolidação do setor no Brasil. Embora o discurso institucional enfatize os benefícios econômicos e energéticos, há pouca preocupação explícita com a forma como esses dados são percebidos pela população.

A linguagem técnica e distante, somada à memória coletiva de acidentes nucleares internacionais, contribui para um ambiente de desconfiança e resistência. Escândalos de corrupção envolvendo a construção da usina e a ausência de campanhas educativas regulares reforçam a percepção de que o projeto é obscuro e arriscado, mesmo diante de seus benefícios comprovados.

Segundo a Sputnik Brasil (2023), uma pesquisa de opinião realizada pela Eletronuclear mostrou que 71% da população de Angra dos Reis apoia o uso da energia nuclear para geração elétrica, destacando principalmente os impactos positivos na economia local, geração de empregos e estabilidade energética. O apoio na cidade, sede das usinas, é significativamente superior à média nacional, que em levantamentos anteriores girava em torno de 39%. Segundo Marco Antônio Alves, superintendente de comunicação da empresa, os moradores reconhecem os benefícios econômicos que a presença das usinas traz, como emprego e movimentação da economia local.

Contudo, essa aprovação não é unânime nem isenta de tensões. Em audiências públicas realizadas no município, moradores expressaram preocupações com os planos de emergência e a exclusão de comunidades vulneráveis das estratégias de proteção. Um dos participantes, Ademílson Vidal, criticou a ausência de medidas voltadas aos moradores das ilhas da região: “Percebi que há uma falha clara no plano de segurança. Por exemplo, ninguém falou dos ilhéus, que são 60% dos cidadãos do município. E, caso ocorra um acidente, quem vai nos atender? Não temos médicos de referência no tratamento de problemas oriundos da radiação.”

Nessa perspectiva, a correspondente da BBC, Júlia Dias Carneiro, em 2011, verificou que um dos moradores demonstram sentimentos ambíguos: embora reconheçam os benefícios econômicos, convivem com o medo diante da proximidade com o empreendimento (Carneiro, 2011). A moradora Maria Lúcia, do bairro Frade, declarou em entrevista: “Eu fico com medo mesmo [...] será que vai ser preciso a gente abandonar os nossos lares? [...] no fundo não é, né? Para a nossa redondeza todinha, é perigos”.

Por outro lado, Carneiro (2011) também averiguou que comerciantes e trabalhadores locais, como Moacir Viana Rabello, reconhecem o papel da usina na geração de empregos: “Gera bastante emprego. Os únicos benefícios que a gente tem aqui são através da usina”. Esses relatos demonstram que, apesar do alto índice de aprovação, persistem dúvidas, receios e percepções de risco, especialmente em relação à transparência, segurança e inclusão social nos processos decisórios.

O debate público sobre Angra 3 tem sido, em grande parte, conduzido por especialistas e instituições, com pouca participação cidadã efetiva. Para reverter esse cenário, é necessário investir em educação científica, transparência nos dados

e estratégias de comunicação acessíveis, que aproximem a população das decisões sobre grandes projetos de infraestrutura. Sem esse diálogo, a energia nuclear continuará enfrentando barreiras sociais que comprometem sua expansão, independentemente de sua viabilidade técnica e econômica. Sem engajamento social ativo e informado, até mesmo os projetos mais tecnicamente viáveis podem se tornar politicamente insustentáveis.

## 5.6 Estratégias para Aumentar a Aceitação Pública da Energia Nuclear

A aceitação pública da energia nuclear é um dos principais desafios para sua expansão em diversos países, especialmente após acidentes como Chernobyl e Fukushima, que alimentaram a percepção de risco associada à tecnologia. No entanto, a experiência de países como Finlândia e França mostra que essa resistência pode ser superada por meio de estratégias consistentes baseadas em transparência, educação científica e diálogo com a população. A seguir, serão analisadas essas duas experiências que podem inspirar políticas públicas no Brasil.

### 5.6.1 A Experiência da Finlândia

A Finlândia é considerada referência internacional em termos de aceitação social da energia nuclear, em especial pelo caso do repositório geológico de Onkalo — o primeiro do mundo destinado ao armazenamento definitivo de resíduos radioativos de longa vida.

Desde o início do processo, o governo finlandês adotou uma abordagem fortemente participativa. As decisões foram tomadas com base em amplas consultas públicas, audiências comunitárias e transparência na divulgação de dados técnicos e ambientais. O projeto foi conduzido por meio de cooperação entre o Estado, o operador nuclear Posiva Oy e as comunidades locais. Dentre os elementos de destaque, incluem-se:

- Autonomia municipal: os municípios tinham o direito de aceitar ou rejeitar a instalação do repositório;
- Contrapartidas claras: comunidades receberam investimentos em infraestrutura, geração de empregos e capacitação técnica;
- Confiança institucional: a credibilidade da STUK (autoridade finlandesa de segurança nuclear) junto à população foi essencial para garantir a percepção de segurança;

- Educação científica continuada: escolas e universidades foram mobilizadas para explicar os fundamentos da tecnologia e os mecanismos de segurança envolvidos.

Como resultado, a população da cidade de Eurajoki — sede do repositório — passou de resistente a favorável ao projeto, que hoje é apontado como um modelo internacional de gestão social e institucional do risco nuclear.

Essa experiência mostra que a aceitação pública pode ser construída com base na inclusão das comunidades no processo decisório, no respeito à autonomia local e no fornecimento de garantias materiais e simbólicas que reduzam a percepção de risco.

#### 5.6.2 A Experiência da França

A França é um dos países com maior dependência da energia nuclear no mundo, com cerca de 70% da eletricidade nacional proveniente de reatores nucleares. Ao contrário da Finlândia, cuja abordagem foca no envolvimento local intensivo, a França adota uma estratégia baseada na normalização do nuclear como parte da identidade energética do país. Essa aceitação é sustentada por três pilares principais:

- Educação técnica e científica: A energia nuclear é ensinada nas escolas desde o ensino fundamental, e o setor possui forte vínculo com centros de pesquisa, universidades e formação técnica. Isso reduz o grau de desinformação e aumenta a compreensão pública sobre a segurança e os benefícios da tecnologia;
- Centros de informação pública: Usinas nucleares francesas mantêm centros abertos à visitação, onde os cidadãos podem conhecer o funcionamento dos reatores, os sistemas de segurança e as medidas de controle de radiação. Além disso, eventos como “Portas Abertas da Energia Nuclear” são realizados anualmente para reforçar o diálogo com a população;
- Discurso institucional consistente: Desde a década de 1970, a energia nuclear é defendida por governos sucessivos como solução estratégica para a independência energética e o combate às mudanças climáticas. Essa continuidade no discurso evita rupturas e incertezas que poderiam

minar a confiança pública.

Apesar de enfrentar movimentos antinucleares em alguns períodos, a França mantém um dos níveis mais altos de aceitação pública da energia nuclear na Europa, inclusive após o acidente de Fukushima. Pesquisas indicam que mais de 60% dos franceses apoiam a manutenção do parque nuclear nacional.

O modelo francês mostra que a confiança social pode ser fortalecida com investimento em educação, acesso a informações claras e continuidade das políticas energéticas, mesmo diante de crises e mudanças políticas.

## 6. Considerações finais

O presente trabalho reforça a importância estratégica da energia nuclear como um dos pilares da segurança energética nacional, especialmente em um país de dimensões continentais como o Brasil, onde a demanda por eletricidade cresce de forma contínua e enfrenta desafios como crises hídricas e a dependência de fontes intermitentes. Ao analisar o caso da Usina de Angra 3, observou-se que a energia nuclear pode representar não apenas uma alternativa complementar na matriz elétrica, mas também um vetor para o desenvolvimento econômico, tecnológico e ambiental do país.

A análise econômica baseada em indicadores clássicos de investimentos — como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) — evidenciou que a retomada do projeto é não apenas viável, mas vantajosa do ponto de vista financeiro. A incorporação do LCOE como métrica adicional reforçou a robustez da proposta, ao demonstrar um perfil tarifário estável e competitivo frente às demais fontes convencionais. Além disso, a conclusão de Angra 3 contribuiria para a redução das emissões de carbono, para o fortalecimento do parque nuclear brasileiro e para o avanço tecnológico em áreas como o ciclo do combustível e a engenharia de reatores.

Contudo, a viabilidade técnica e econômica, por si só, não assegura a continuidade e o sucesso de projetos nucleares. A aceitação pública emerge como um fator determinante para a consolidação dessa fonte energética no Brasil. Fatores como o medo associado a acidentes históricos, a ausência de campanhas educativas, a baixa transparência institucional e os escândalos de corrupção impactam diretamente a percepção social, alimentando desconfiança e resistência. Enfrentar esse cenário requer políticas consistentes de comunicação pública, engajamento comunitário e valorização do conhecimento científico como instrumento de empoderamento social.

A comparação com experiências internacionais, como as da Finlândia e da França, evidencia que é possível reverter cenários de desconfiança por meio de planejamento transparente, continuidade institucional e participação cidadã ativa. Ainda que esses modelos não possam ser aplicados de forma direta ao contexto brasileiro, eles oferecem caminhos que, se devidamente adaptados às realidades culturais, educacionais e políticas do país, podem contribuir para transformar a



relação da sociedade com a energia nuclear.

Reconhece-se, entretanto, que este estudo se baseou exclusivamente em análise documental e indicadores secundários, o que limita a captação direta de percepções sociais. Essa limitação aponta para a importância de estudos futuros que incluam entrevistas e dados primários, especialmente em regiões diretamente afetadas por empreendimentos nucleares, como Angra dos Reis.

Conclui-se, portanto, que o futuro da energia nuclear no Brasil dependerá da capacidade de articulação entre governo, setor produtivo, instituições científicas e sociedade civil. Somente por meio desse diálogo ampliado será possível garantir que a energia nuclear deixe de ser vista como uma ameaça distante e passe a ser compreendida como uma ferramenta legítima para o desenvolvimento sustentável, a soberania energética e a transição para um modelo de baixo carbono — justo, confiável e socialmente aceito.

## 7. Referências bibliográficas

ABDALA, Vitor. Especialistas divergem sobre uso da energia nuclear no Brasil. **Agência Brasil**, 24 mar. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-03/especialistas-divergem-sobre-uso-da-energia-nuclear-no-brasil>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ARCHILA, Daniela Lima Cerqueira; CAMPOS, Tereza Raquel Taulois. Portfólio de patentes em tecnologias nucleares e outras tecnologias competitivas da CNEN com foco na sustentabilidade. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 187-210, 2021.

ARTHUR LITTLE. The growth & future of small modular reactors. **Arthur Little**, 2025. Disponível em: <https://www.adlittle.com/en/insights/report/growth-future-small-modular-reactors>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ASSI, Vitor; SABUNDJIAN, Gaianê; FANG, Orlando Si Kae. Preliminary Risk Analysis for the Installation of Small Modular Reactors in Energy-Deficient Regions of Brazil. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1-20, 2024.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Apresentação Market Sounding – Programa de Concessões Rodoviárias de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: BNDES, 2021. Disponível em: [https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/export/sites/default/cms/anexos-livres/rodovias/A\\_presentacao-Market-Sounding-Julho\\_2021.pdf](https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/export/sites/default/cms/anexos-livres/rodovias/A_presentacao-Market-Sounding-Julho_2021.pdf). Acesso em: 21 ago. 2025.

BASTOS, Marcello Costa.; MORAES, Rafael Camargo de. **Perspectivas para a energia nuclear no Brasil**. 2019. 22f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2019.

BORGES, Fabricio Quadros. Estrutura institucional do setor de energia elétrica no Brasil e o desenvolvimento sustentável. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 3, p. 198-212, 2021.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 dez. 2017. Seção 2, p. 1.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Efeito estufa e aquecimento global. **MMA**, 2020. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global.html>. Acesso em: 21 ago. 2025.

BRASIL. **PROSUB**: conheça os detalhes do Programa de Desenvolvimento de Submarinos da Marinha do Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/03/prosub-conheca-os-detalhes-do-programa-de-desenvolvimento-de-submarinos-da-marinha-do-b>

rasil. Acesso em: 21 ago. 2025.

CAMELO, Ana Paula. Participação pública em políticas energéticas em debate: estudo de caso em torno da energia nuclear no Brasil. **Revista Sinais**, v. 21, n. 1, 2017.

CARNEIRO, Júlia Dias. Riscos e benefícios de usinas dividem moradores de Angra. **BBC**, 26 abr. 2011. Disponível em: [https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2011/04/110421\\_angra\\_video\\_texto\\_jc](https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2011/04/110421_angra_video_texto_jc). Acesso em: 21 ago. 2025.

CLIENTEARTH. Fossil fuels and climate change: the facts. **Clientearth**, 2021. Disponível em: <https://www.clientearth.org/latest/news/fossil-fuels-and-climate-change-the-facts/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. CNEN autoriza extensão da operação de Angra 1 por mais 20 anos. **CNEN**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ird/pt-br/assuntos/noticias/noticias-2024/cnen-autoriza-extensao-da-operacao-de-angra-1-por-mais-20-anos>.

CORREIO BRAZILIENSE. BNDES: desistir de Angra 3 custará quase o mesmo valor que para concluir obra. **Correio Braziliense, Brasília**, 3 set. 2024. Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/economia/2024/09/6934364-bnds-desistir-de-a-gra-3-custara-quase-o-mesmo-valor-que-para-concluir.html>. Acesso em: 17 ago. 2025.

ELETRONUCLEAR. Eletronuclear recebe estudo do BNDES sobre Angra 3. **Eletronuclear**, 03 set. 2024. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Eletronuclear-recebe-estudo-do-BNDES-sobre-Angra-3.aspx>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ELETRONUCLEAR. Estudo técnico – estudo independente e aprofundado sobre a viabilidade técnica, econômica e jurídica da construção da usina Angra 3. Relatório entregue à Eletronuclear, 3 set. 2024. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Paginas/Eletronuclear-recebe-estudo-do-BNDES-sobre-Angra-3.aspx>. Acesso em: 21 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**: Sumário Executivo. Brasília: EPE, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-45/topico-79/Sum%C3%A1rio%20Executivo%20do%20PDE%202024.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Small Modular Reactors explained. **European Commission**, 2025. Disponível em: [https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/small-modular-reactors/small-modular-reactors-explained\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/small-modular-reactors/small-modular-reactors-explained_en). Acesso em: 21 ago. 2025.

FERREIRA, Francisca das Chagas da Silva. **A energia nuclear em uma**

**abordagem Ciência, Tecnologia e Sociedade como possibilidade de engajamento científico-social.** 2023. 101f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023.

FGV ENERGIA. Estudo dos impactos socioeconômicos das atividades nucleares no Brasil. **Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas**, 2024. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/pesquisa-estudo/estudo-dos-impactos-socioeconomicos-das-atividades-nucleares-no-brasil>. Acesso em: 17 ago. 2025.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. O desafio da aceitação pública da energia nuclear. **Revista Marítima Brasileira**, v. 135, n. 10/12, p. 106-116, 2015.

GUIMARÃES, Leonam. Angra 3 e a estratégia nuclear da Marinha do Brasil: interdependências e justificativas para sua conclusão. **Defesanet**, 28 maio. 2025. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/nuclear/angra-3-e-a-estrategia-nuclear-da-marinha-do-brasil-interdependencias-e-justificativas-para-sua-conclusao/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

IEA - International Energy Agency. Explore energy data by category, indicator, country, or region. **IEA**, Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/datatables?country=WORLD>. Acesso em: 14 fev 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA; NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA. **Projected Costs of Generating Electricity 2020**. Paris: OECD Publishing, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>. Acesso em: 21 ago. 2025.

JERÔNIMO, Renato Bezerra. **A importância da energia nuclear no processo de transição energética**: considerações à luz do princípio da precaução. 2023. 105f. Monografia (Bacharelado em Direito) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

JONUSAN, Raoni Adão. **Avaliação de metodologias para o gerenciamento de combustível nuclear usado no Brasil**. 2021. 203f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MACHADO, Luis; HANSEN, Gilvan Luiz. Opinião pública sobre energia nuclear enquanto sistema perito nas sociedades de risco da modernidade. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 6, n. 3, 2018.

MACHADO, Tariana Brocardo. **Aceitação da energia nuclear por parte da opinião pública no Brasil**. 2021. 234f. Tese (Doutorado em Ciências da Comunicação) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MACIEIRA, Keila. **Novos revestimentos para reatores a água pressurizada – um estudo neutrônico**. 2020. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas

Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, 2020.

MARINHA DO BRASIL. **Programa de Desenvolvimento de Submarinos – PROSUB**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos/prosub>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MARINHA DO BRASIL. **Programa Nuclear da Marinha**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/ctmsp/content/programa-nuclear-da-marinha>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MARTIM, Jean-Marie. **A Economia Mundial da Energia**. São Paulo: Editora UNESP, 1990-1992.

MOURA, Bruno de Freitas. Saiba mais sobre o uso da energia nuclear no Brasil e no mundo. **Agência Brasil**, 29 jun. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-06/saiba-mais-sobre-o-uso-da-energia-nuclear-no-brasil-e-no-mundo>. Acesso em: 21 ago. 2025.

MOURA, Felipe Roberto Barros de. **O papel da energia nuclear na transição e na segurança e autossuficiência energética dos países**. 2022. 33f. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MURAYAMA, Caio Cesar Salgado.; SCHMID, Fernando Pagnin. **Perspectivas para a energia nuclear no Brasil**. 2021. 22f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021.

PINHO, Bruno Estanqueira; OLIVA, José de Jesus Rivero; MAIA, Yran Leite. An approach for evaluation of the spent nuclear fuel management strategy for Brazilian nuclear power plants based on Multi-Criteria Decision-Making methodology. **Nuclear Engineering and Design**, v. 424, p. 112511, 2024.

POLÍTICA BRASILEIRA. Comissão da Câmara discute retomada da construção da usina nuclear Angra 3. **Política Brasileira**, 27 maio 2025. Disponível em: <https://politicabrasileira.com.br/politicas-publicas/tecnologia/comissao-da-camara-discute-retomada-da-construcao-da-usina-nuclear-angra-3/>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA – SEMIL. Efeito estufa. **SEMIL**, 2023. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/efeito-estufa/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

SOUZA, Gabriel Romano Marquez. **Abordagem Investigativa sobre o Acidente de Chernobyl**. 2022. 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Uberlândia, 2022.

SOUZA, Lucas Emanuel Goecking Liesner de; LIMA, Carolina Carneiro. Energia Nuclear: Desafio Atual, Universalização E Medo Social. **Dom Helder – Revista de Direito**, v. 2, n. 2, p. 63-90, 2019.

SOUZA, Luciana Aparecida Dutra de. **Um estudo comparado entre as matrizes elétricas do Brasil e da França nos últimos 10 anos**. 2022. 62f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SPUTNIK BRASIL. Pesquisa revela que mais de 70% da população de Angra dos Reis é favorável ao uso de energia nuclear. **Sputnik Brasil**, 15 mar. 2023. Disponível em: <https://noticiabrasil.net.br/20230315/pesquisa-revela-que-mais-de-70-da-populacao-de-angra-dos-reis-e-favoravel-ao-uso-de-energia-nuclear-28056451.html>. Acesso em: 21 ago. 2025.

TAKAHASHI, Laura Cardoso; TAVEIRA, Natália Fonseca; CORREA, Bárbara Braga Gualberto. Divulgação de tecnologias nucleares para a sociedade. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 1-19, 2021.

TELES, Bruno. Brazil boosts mining in one of the world's largest uranium reserves, builds Brazilian multipurpose reactor, and seeks nuclear sovereignty. **Click Petróleo e Gás**, 10 jun. 2025. Disponível em: <https://en.clickpetroleoegas.com.br/brasil-impulsiona-mineracao-em-uma-das-maiore-s-reservas-de-uranio-do-mundo-constroi-o-reator-multiproposito-brasileiro-e-busca-a-soberania-nuclear-btl96/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Thorium statistics and information. **World Nuclear Association**, 2024. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>. Acesso em: 21 ago. 2025.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Thorium**. 2 maio. 2024. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium>. Acesso em: 21 ago. 2025.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors. **World Nuclear Association**, 2025a. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>. Acesso em: 21 ago. 2025.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Uranium Enrichment. **World Nuclear Association**, 2025b. Disponível em: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment>.

WORLD NUCLEAR INDUSTRY. **A closer look at two operational small modular reactor designs**. 11 mar. 2024. Disponível em: <https://www.worldnuclearreport.org/A-Closer-Look-at-Two-Operational-Small-Modular-Reactor-Designs>. Acesso em: 21 ago. 2025.