

O PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR NA REDUÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA: ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E SUSTENTÁVEL

THE ROLE OF NUCLEAR ENERGY IN REDUCING ATMOSPHERIC POLLUTION: A TECHNICAL-ECONOMIC AND SUSTAINABLE ANALYSIS

Widrian Panzenhagen¹ e Sergio Roberto Mortari²

RESUMO

A poluição atmosférica, intensificada pelo uso de combustíveis fósseis na geração elétrica, constitui uma das principais causas de impactos ambientais e de problemas de saúde pública, afetando diretamente a qualidade do ar e contribuindo para o aquecimento global. Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar o papel da energia nuclear na redução da poluição atmosférica, comparando seu desempenho técnico, econômico e sustentável em relação às fontes fósseis, com ênfase nas termelétricas a carvão e a gás natural. A pesquisa adota uma abordagem qualitativa e documental, baseada em dados de instituições nacionais e internacionais, como CNEN, EPE, IAEA e IEA. Foram analisados indicadores de emissões de poluentes, custos de construção e operação, consumo de combustível e viabilidade econômica em diferentes horizontes temporais. O referencial teórico aborda o funcionamento dos reatores nucleares, o gerenciamento de resíduos e os avanços tecnológicos dos reatores de quarta geração, destacando sua segurança e eficiência. Os resultados demonstram que, embora o custo inicial da energia nuclear seja elevado, suas emissões de CO₂ são centenas de vezes menores que as das termelétricas fósseis, e seu custo operacional é mais estável a longo prazo, tornando-a uma alternativa sustentável e competitiva. Conclui-se que a substituição gradual das fontes fósseis por reatores nucleares de nova geração é uma estratégia eficaz para reduzir a poluição atmosférica, mitigar os impactos climáticos e promover uma matriz energética mais limpa e segura.

Palavras-chave: energia nuclear; poluição atmosférica; sustentabilidade; reatores de quarta geração; matriz energética.

ABSTRACT

Air pollution, intensified by the use of fossil fuels in electricity generation, is one of the main causes of environmental degradation and public health problems, directly affecting air quality and contributing to global warming. In this context, this study aims to analyze the role of nuclear energy in reducing air pollution, comparing its technical, economic, and sustainable performance with fossil sources, particularly coal- and gas-fired power plants. The research adopts a qualitative and documentary approach, based on data from national and international institutions such as CNEN, EPE, IAEA, and IEA. Key indicators such as pollutant emissions, construction and operating costs, fuel consumption, and long-term economic feasibility were analyzed. The theoretical framework discusses the operation of nuclear reactors, waste management, and the technological advances of fourth-generation reactors, emphasizing their safety and efficiency. The results show that although nuclear energy has a higher initial cost, their CO₂ emissions are hundreds of times lower than those of fossil fuel power plants, and their operating costs are more stable in the long

1 E-mail: widrian.gabriel@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8995-0995>

2 E-mail: mortari@ufn.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3980>

term, and its operational costs are more stable over time, making it a sustainable and competitive alternative. It is concluded that the gradual replacement of fossil sources with new-generation nuclear reactors is an effective strategy to reduce atmospheric pollution, mitigate climate impacts, and promote a cleaner and more secure energy matrix.

Keywords: *nuclear energy; air pollution; Sustainability; fourth-generation reactor; energy matrix.*

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos principais desafios ambientais globais, com impactos diretos na saúde humana, na biodiversidade e no clima. No Brasil, estudos do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2022) indicam que as emissões de poluentes estão fortemente associadas ao uso de combustíveis fósseis no setor de transportes, na indústria e em termelétricas. Esse cenário é agravado em momentos de crise hídrica, quando a matriz elétrica, embora majoritariamente renovável, recorre ao acionamento intensivo de usinas movidas a carvão, petróleo e gás natural (EPE, 2023).

Os combustíveis fósseis, historicamente a base da matriz energética mundial devido à sua alta densidade energética, apresentam elevados impactos ambientais. Sua combustão resulta na emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que intensificam o efeito estufa natural e contribuem para o aquecimento global, mudanças climáticas extremas e problemas de saúde pública (IPCC, 2023). Além das emissões atmosféricas, esses combustíveis demandam processos de extração e refino altamente poluentes, que ampliam os impactos ambientais e sociais associados ao seu ciclo de vida (IBAMA, 2023).

Nesse contexto, cresce a busca por alternativas energéticas de baixo carbono. As fontes renováveis, como solar e eólica, expandem sua participação na matriz, mas apresentam limitações relacionadas à intermitência e à necessidade de sistemas de armazenamento ou de backup. A energia nuclear, por sua vez, combina baixas emissões de carbono, elevada densidade energética e estabilidade no fornecimento, destacando-se como uma tecnologia estratégica para complementar as fontes renováveis e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (CNEN, 2023; IEA, 2022).

Apesar de seus benefícios ambientais, a nuclear enfrenta desafios técnicos, econômicos e sociais. Entre eles, destacam-se a gestão de resíduos radioativos, o alto custo inicial de implantação e a percepção pública quanto à segurança. Contudo, avanços recentes, como os reatores de quarta geração, vêm ampliando a eficiência, reduzindo o passivo ambiental e abrindo novas aplicações, como a produção de hidrogênio, a dessalinização da água e o fornecimento de calor para processos industriais (GIF, 2023; IAEA, 2023).

Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo avaliar o papel da energia nuclear na redução da poluição atmosférica, por meio de uma análise comparativa das principais fontes energéticas, considerando aspectos técnicos, econômicos e sustentáveis no contexto brasileiro.

O trabalho também busca discutir os impactos associados ao ciclo do combustível de diferentes fontes, examinar a sustentabilidade da energia nuclear e apresentar inovações tecnológicas que podem transformar sua contribuição para a transição energética.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA NUCLEAR: CONCEITOS E FUNCIONAMENTO

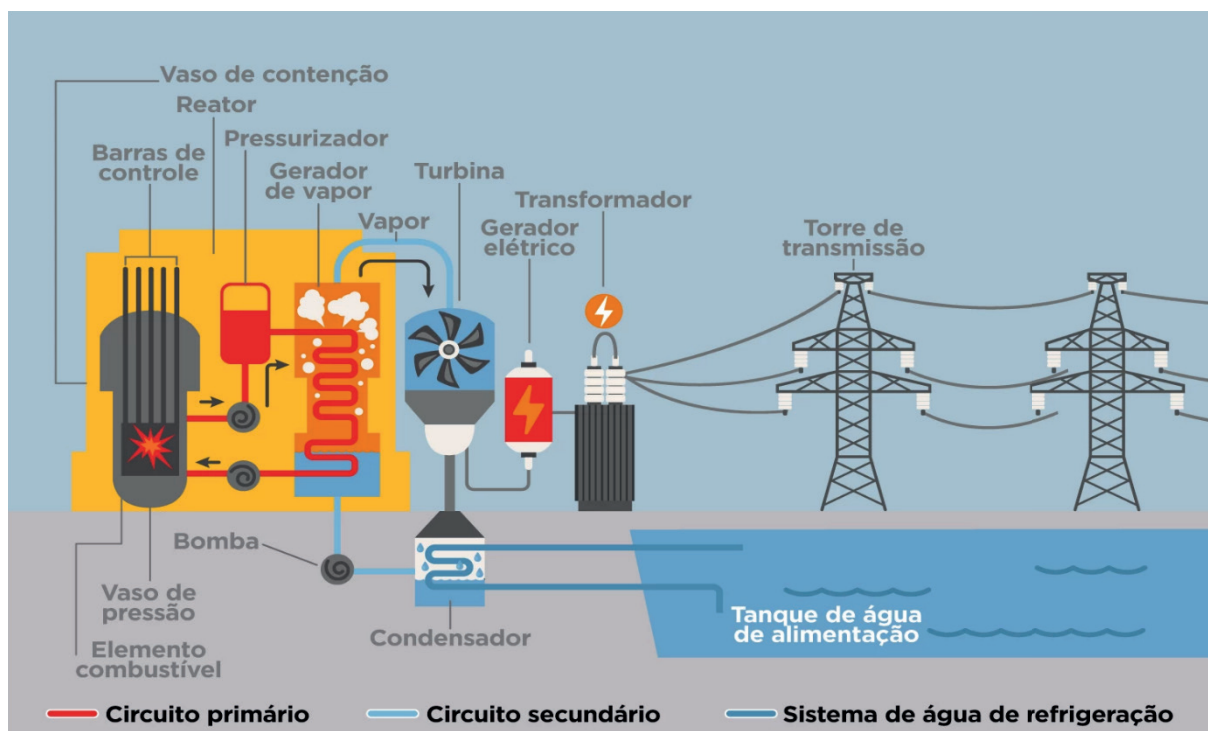
A energia nuclear é uma forma de geração de eletricidade baseada no aproveitamento da energia liberada durante reações nucleares, predominantemente por meio do processo de fissão nuclear. A fissão ocorre quando um núcleo atômico pesado, como o do urânio-235, é bombardeado por um nêutron térmico (de baixa energia, cerca de 0,025 eV), resultando na liberação de grande quantidade de energia térmica, que é utilizada para aquecer a água e produzir vapor. Esse vapor movimenta turbinas acopladas a geradores, convertendo a energia térmica em energia elétrica (CNEN, 2023).

Os reatores nucleares podem ser classificados em diversas categorias conforme o seu desenho e tecnologia empregada. Entre os principais tipos, destacam-se os reatores de água pressurizada (PWR), que representam a maioria das instalações em operação, os reatores de água fervente (BWR) e as tecnologias avançadas, como os reatores de leito de esferas e os reatores de sal fundido. A evolução tecnológica tem sido direcionada para aumentar a eficiência e a segurança dessas usinas, reduzindo riscos operacionais e melhorando o aproveitamento do combustível nuclear (EPE, 2023).

A segurança nuclear é um dos aspectos fundamentais dessa tecnologia, envolvendo medidas rigorosas para prevenir acidentes e mitigar seus impactos. O gerenciamento de resíduos nucleares é outra questão essencial, sendo os rejeitos classificados conforme seu nível de radioatividade. Os resíduos de baixa e média atividade são armazenados temporariamente antes da disposição final, enquanto os de alta atividade, como o combustível usado, podem ser reprocessados ou armazenados em locais geologicamente seguros (IAEA, 2023).

A Figura 1 ilustra o funcionamento básico de uma usina nuclear do tipo reator de água pressurizada (PWR). O esquema destaca os principais componentes do sistema, incluindo o reator nuclear, onde ocorre a fissão do combustível, gerando calor para aquecer a água no circuito primário (vermelho). Esse calor é transferido para o circuito secundário (azul), onde a água se transforma em vapor e movimenta uma turbina acoplada a um gerador elétrico. Após passar pelo condensador, o vapor é resfriado e retorna ao estado líquido, sendo recirculado no sistema. O processo conta ainda com um sistema de água de refrigeração (cinza-azul), que dissipa o calor residual para um tanque de água de alimentação. Esse modelo de geração de energia destaca a eficiência e a confiabilidade da energia nuclear como fonte de eletricidade de baixo carbono.

Figura 1 - Esquema de funcionamento de uma usina nuclear.



Fonte: CBIE.

2.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SUAS CONSEQUÊNCIAS

A poluição atmosférica constitui um dos principais desafios ambientais da atualidade, com efeitos diretos sobre o clima e a saúde pública. Os poluentes mais relevantes relacionados à geração de energia incluem dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$). Esses compostos estão associados ao agravamento do efeito estufa, ao aumento das temperaturas globais e à intensificação de fenômenos como a chuva ácida e a inversão térmica, além de contribuírem para doenças respiratórias e cardiovasculares em populações expostas (IBAMA, 2023; ANVISA, 2023).

No Brasil, órgãos reguladores como o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) têm estabelecido padrões de qualidade do ar e limites de emissões para setores industriais e energéticos. Ainda assim, episódios de poluição atmosférica severa continuam sendo registrados em centros urbanos e regiões com alta concentração de termelétricas fósseis, evidenciando a necessidade de fontes energéticas mais limpas e sustentáveis (CONAMA, 2023; EPE, 2023).

2.3 COMPARAÇÃO ENTRE FONTES ENERGÉTICAS

A matriz energética mundial é composta por três grandes grupos de fontes: fósseis, renováveis e nuclear. O carvão mineral e o petróleo apresentam elevados índices de emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa, constituindo as opções mais críticas do ponto de vista ambiental. O gás natural, embora menos poluente, ainda contribui de forma significativa para as emissões globais de CO₂ (IEA, 2022).

As fontes renováveis, como solar e eólica, caracterizam-se pela ausência de emissões durante a operação, mas apresentam limitações relacionadas à intermitência e à necessidade de sistemas de armazenamento ou respaldo térmico. A energia hidrelétrica, amplamente utilizada no Brasil, possui baixo nível de emissões em seu ciclo de vida, embora cause impactos ambientais relevantes em ecossistemas aquáticos devido à formação de reservatórios (EPE, 2023).

A energia nuclear, por sua vez, combina baixas emissões de carbono com elevada densidade energética e estabilidade no fornecimento. Sua operação contínua, independente de condições climáticas, confere segurança ao sistema elétrico e complementa a produção variável das fontes renováveis. No entanto, o setor nuclear enfrenta desafios econômicos e ambientais, sobretudo no que se refere aos custos iniciais de implantação e à gestão de resíduos radioativos (World Nuclear Association, 2023; CNEN, 2023).

2.4 SUSTENTABILIDADE E ENERGIA NUCLEAR

A energia nuclear é considerada uma fonte de baixo carbono e desempenha papel estratégico na transição para matrizes energéticas mais sustentáveis. Sua avaliação, porém, exige a análise de todo o ciclo de vida (Life Cycle Assessment - LCA), incluindo aspectos técnicos, ambientais e sociais. O enriquecimento do urânio, etapa essencial para torná-lo apto ao uso em reatores, demanda elevado consumo energético e gera resíduos que requerem gestão rigorosa para evitar impactos ambientais. As usinas também dependem de grandes volumes de água para resfriamento, o que pode afetar ecossistemas aquáticos e representar desafio em regiões com escassez hídrica. Apesar dessas limitações, a energia nuclear apresenta emissões extremamente baixas quando analisada no ciclo completo, comparáveis às fontes renováveis, e menor uso de solo e de recursos naturais quando comparada a alternativas como hidrelétricas, solares e eólicas.

A sustentabilidade econômica também é relevante: embora o custo inicial seja elevado e o gerenciamento de rejeitos radioativos complexo, tecnologias emergentes, como os reatores de quarta geração e os pequenos reatores modulares (SMRs), que podem ser desenvolvidos tanto com tecnologias da geração III+ quanto com conceitos avançados de geração IV, tendem a aumentar a eficiência e reduzir custos operacionais. A nuclear ainda contribui para a segurança energética ao reduzir a

dependência de combustíveis fósseis importados e minimizar riscos geopolíticos. Soluções modernas, como sistemas de resfriamento a seco, estão sendo desenvolvidas para mitigar impactos no consumo de água. O reconhecimento internacional da energia nuclear como fonte sustentável em taxonomias verdes reforça seu potencial de atrair investimentos e consolidar-se como componente essencial de uma matriz energética limpa, estável e resiliente.

3 METODOLOGIA

O estudo utiliza uma abordagem qualitativa e exploratória, baseada em pesquisa bibliográfica e documental, permitindo analisar de forma aprofundada os impactos ambientais e energéticos das diferentes fontes de geração elétrica e identificar tendências e desafios relacionados ao uso da energia nuclear no Brasil. A pesquisa bibliográfica incluiu livros, artigos científicos e relatórios técnicos de instituições como CNEN, EPE, IAEA, IEA e WNA, priorizando publicações recentes. A pesquisa documental envolveu a coleta e organização de dados oficiais sobre matriz elétrica, custos de implantação, fatores de capacidade, tempo de retorno financeiro e emissões atmosféricas, obtidos em relatórios da EPE, IEA, WNA, IBAMA e CONAMA. Para a comparação entre as fontes energéticas, foram definidos indicadores como potência instalada, custo total de construção, retorno do investimento, emissões anuais de CO₂ e participação na matriz elétrica. Os valores apresentados foram adaptados para um cenário de geração anual de 33.000 GWh, possibilitando comparações consistentes. Também foi realizada uma análise do ciclo de combustíveis, carvão, petróleo, gás natural, biomassa e urânio, abrangendo etapas de extração, refino, transporte e operação, evidenciando os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida. Todos os resultados foram organizados em tabelas e quadros comparativos e analisados sob a perspectiva da sustentabilidade, em diálogo com a literatura técnica e científica recente sobre transição energética.

Deve-se destacar que as diferentes fontes energéticas apresentam fatores de capacidade distintos, o que influencia a potência instalada necessária para atingir a mesma geração anual de energia. Assim, embora a comparação utilize o custo total de construção para sistemas dimensionados para produzir 33.000 GWh/ano, reconhece-se que análise econômica mais abrangentes frequentemente utilizam o custo nivelado da eletricidade (LCOE), que considera todo o ciclo de vida da usina. No presente estudo, optou-se pela comparação baseada na geração anual equivalente para facilitar a análise dos impactos ambientais e operacionais entre as tecnologias.

4 COMPARATIVO DAS FONTES ENERGÉTICAS PRINCIPAIS

A análise comparativa das principais fontes energéticas evidencia diferenças significativas quanto às emissões atmosféricas e ao custo de geração. A tabela 1 apresenta os valores estimados para a produção anual de 33.000 GWh, considerando diferentes matrizes energéticas.

Tabela 1 - Comparação entre emissões de poluentes e custos médios de diferentes fontes energéticas para geração de 33.000 GWh/ano.

| Fonte de Energia | Potência Instalada (MW) | Custo Total (US\$) | Tempo de Retorno (Anos) | Emissão Anual de CO ₂ (MtCO ₂ /ano) | Participação no Brasil (%) | Participação Mundial (%) |
|------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---|----------------------------|--------------------------|
| Nuclear | 4187 | 37,67 bi | 7,61 | 0,33 | 2,5 | 10 |
| Carvão | 5024 | 22,61 bi | 4,57 | 26,24 | 6 | 35 |
| Gás Natural | 6280 | 12,56 bi | 2,54 | 13,20 | 9 | 24 |
| Hidrelétrica | 7534 | 37,67 bi | 7,61 | 0,17 | 60 | 16 |
| Eólica | 9418 | 23,55 bi | 4,76 | 0,13 | 9 | 5 |
| Solar | 15068 | 37,67 bi | 7,61 | 1,32 | 13 | 5 |

Fonte: elaborado pelo autor (2025), com base em EPE (2023), CNEN (2023), IEA (2022) e World Nuclear Association (2023).

4.1 POTÊNCIA INSTALADA (MW)

As fontes renováveis intermitentes, como solar (15.068 MW) e eólica (9.418 MW), apresentam maior potência instalada, reflexo da necessidade de compensar sua baixa densidade energética. Em contrapartida, a energia nuclear, com 4.187 MW, mantém geração contínua e confiável, sustentada por um fator de capacidade superior a 85%. Isso reforça seu papel como alternativa estável para complementar as renováveis e reduzir a dependência de termelétricas fósseis em períodos de baixa hidraulicidade. A diferença na potência instalada necessária para atingir a mesma geração anual está diretamente relacionada ao fator de capacidade das tecnologias. Esse indicador representa a razão entre a energia que seria gerada caso operasse continuamente em potência máxima ao longo do ano. Usinas nucleares apresentam fatores de capacidade elevados, frequentemente superiores a 85%, enquanto fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, possuem fatores significativamente menores devido à variabilidade climática. Dessa forma, tecnologias com menor fator de capacidade necessitam de maior potência instalada para produzir a mesma quantidade anual de energia elétrica.

4.2 CUSTO TOTAL DE CONSTRUÇÃO (US\$)

Os investimentos iniciais em grandes empreendimentos hidrelétricos, nucleares e solares são elevados, situando-se em torno de US\$ 37,67 bilhões. Apesar disso, essas fontes oferecem longevidade operacional e previsibilidade de custos ao longo de décadas. Termelétricas fósseis, como carvão e gás natural, demandam menos capital inicial (US\$ 22,61 bilhões e US\$ 12,56 bilhões, respectivamente), mas implicam custos ambientais e sociais elevados, devido às altas emissões de poluentes e aos impactos na saúde pública.

4.3 TEMPO ESTIMADO DE RETORNO DO INVESTIMENTO (ANOS)

Fontes fósseis apresentam retorno financeiro mais rápido, com destaque para o gás natural (2,54 anos) e o carvão (4,57 anos). Essa atratividade de curto prazo, porém, contrasta com seus altos custos ambientais. Já as fontes limpas, como nuclear e hidrelétrica, demandam prazos de retorno mais longos (7,61 anos), mas garantem estabilidade de preços e contribuem para a mitigação das mudanças climáticas, fatores que se tornam estratégicos no médio e longo prazo.

4.4 EMISSÃO ANUAL DE CO₂ (MtCO₂)

O carvão (26,24 MtCO₂/ano) e o gás natural (13,20 MtCO₂/ano) se destacam como os maiores emissores. A energia solar, embora considerada limpa, apresenta emissões indiretas de 1,32MtCO₂/ano associadas ao ciclo de vida de fabricação e transporte dos módulos. Em contraste, a energia nuclear (0,33 MtCO₂/ano) apresenta valores próximos aos da hidrelétrica (0,17 MtCO₂/ano) e da eólica (0,13 MtCO₂/ano), consolidando-se como fonte de baixo carbono comparável às principais renováveis.

4.5 PARTICIPAÇÃO NO BRASIL (%)

A matriz elétrica brasileira é dominada pela hidreletricidade (60%), seguida pela solar (13%) e pela eólica (9%). Apesar do seu potencial, a energia nuclear representa apenas 2,5% da matriz, participação quatro vezes menor que a média mundial. Isso indica espaço para expansão nuclear no Brasil, especialmente como fonte estável em cenários de escassez hídrica.

4.6 PARTICIPAÇÃO MUNDIAL (%)

Globalmente, os combustíveis fósseis ainda predominam, com o carvão (35%) e o gás natural (24%) respondendo pela maior parte da matriz elétrica. A energia nuclear apresenta 10% de participação, refletindo a adoção significativa por países que buscam reduzir emissões e garantir segurança energética. O contraste com a participação brasileira (2,5%) evidencia que a opção nuclear ainda é pouco explorada no país, mas representa oportunidade estratégica diante da necessidade de diversificação da matriz e do cumprimento das metas climáticas.

4.7 ANÁLISE GERAL

Os resultados reforçam que a energia nuclear, apesar do elevado custo inicial e do prazo mais longo de retorno financeiro, é competitiva do ponto de vista ambiental, apresentando emissões

equivalentes às das fontes renováveis no ciclo de vida completo. Além disso, oferece confiabilidade ao sistema elétrico, aspecto essencial para complementar a variabilidade das renováveis intermitentes.

Para o Brasil, a ampliação da participação nuclear poderia reduzir a dependência de termelétricas fósseis em períodos de seca, assegurar maior estabilidade no fornecimento e contribuir para os compromissos assumidos no Acordo de Paris. Avanços em tecnologias como reatores de quarta geração e pequenos reatores modulares (SMRs) também tendem a reduzir custos e ampliar a aceitação social da energia nuclear, fortalecendo sua inserção em um cenário de transição energética sustentável.

5 ANÁLISE DO CICLO DE COMBUSTÍVEIS E IMPACTOS AMBIENTAIS

A avaliação das fontes de geração elétrica exige a análise de todo o ciclo de combustíveis, englobando etapas de extração, beneficiamento e transporte, pois essas fases determinam o consumo energético e os impactos ambientais associados a cada matriz. O carvão mineral apresenta operações de mineração e beneficiamento intensivas, com elevadas emissões de CO₂, SO₂, NO_x e material particulado, além de impactos graves sobre solos, corpos hídricos e ecossistemas. O petróleo demanda processos industriais complexos e energeticamente custosos, como destilação e craqueamento, gerando grandes volumes de poluentes atmosféricos e riscos de derramamentos durante transporte e manuseio.

O gás natural requer purificação prévia e libera CO₂ e metano em suas etapas de extração e transporte, sendo menos poluente que o carvão e o petróleo, porém ainda significativo para o efeito estufa. A biomassa, embora renovável, envolve emissões relacionadas ao transporte e à queima, sendo considerada de baixo impacto apenas quando provém de cadeias sustentáveis. O urânio, por sua vez, passa por mineração e enriquecimento, etapas que demandam energia, mas apresentam emissões atmosféricas mínimas; seus principais impactos ambientais decorrem da geração de rejeitos radioativos, que exigem manejo seguro e armazenamento em longo prazo. A síntese comparativa evidencia que carvão e petróleo possuem os maiores danos ambientais, enquanto o urânio se destaca como combustível de baixo carbono no ciclo completo, reforçando o papel estratégico da energia nuclear em uma transição energética sustentável e em alinhamento com tecnologias avançadas que buscam redução de impactos e aumento da eficiência.

6 AVANÇOS TECNOLÓGICOS: REATORES NUCLEARES DE QUARTA GERAÇÃO

Os reatores nucleares de quarta geração (Gen IV) representam um avanço significativo em relação aos modelos atualmente em operação, com melhorias que englobam segurança, eficiência, sustentabilidade e redução de impactos ambientais. Desenvolvidos no âmbito do Generation IV International Forum (GIF), esses reatores buscam atender critérios fundamentais: maior aproveitamento

do combustível, fechamento do ciclo do combustível, menor geração de resíduos, segurança passiva e flexibilidade de aplicação em setores além da geração elétrica (GIF, 2023).

Entre os benefícios ambientais e operacionais esperados, destacam-se:

- Emissões diretas nulas de dióxido de carbono (CO₂) e de poluentes atmosféricos durante a operação;
- Eficiência térmica superior, resultando em menor consumo de combustível e menor demanda por mineração e transporte;
- Possibilidade de utilização em processos industriais poluentes, como a siderurgia e a produção de cimento, fornecendo calor limpo e contínuo em substituição a combustíveis fósseis.

6.1 REDUÇÃO DAS EMISSÕES, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Os reatores de quarta geração operam em temperaturas elevadas (700-1000 °C), o que amplia suas aplicações para além da geração elétrica. Essa característica possibilita o uso direto de calor nuclear em processos industriais intensivos em energia, tradicionalmente supridos pela queima de combustíveis fósseis.

Geração de calor industrial: setores como siderurgia, refino de petróleo e indústria química podem se beneficiar do calor nuclear, reduzindo significativamente as emissões de CO₂. Reatores como os GFRs (Gas-Cooled Fast Reactors) e VHTRs (Very High Temperature Reactors) são projetados para esse tipo de aplicação.

- Produção de hidrogênio limpo: processos térmicos e híbridos de reforma da água (termoquímica ou eletrólise de alta temperatura) tornam a produção de hidrogênio mais eficiente, fornecendo um combustível estratégico para a transição energética.
- Dessalinização da água: em regiões áridas ou semiáridas, o calor nuclear pode ser aplicado em plantas de dessalinização térmica, contribuindo para o abastecimento hídrico sustentável.
- Cogeração: a possibilidade de produzir simultaneamente eletricidade e calor de processo eleva a eficiência global dos sistemas para acima de 80%, otimizando o uso dos recursos nucleares.

6.2 SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DE RESÍDUOS

Um dos maiores avanços dos reatores Gen IV refere-se ao gerenciamento dos resíduos radioativos. Modelos como os reatores rápidos (SFRs e GFRs) permitem o reaproveitamento de combustíveis usados, incluindo plutônio e actínídeos menores. Esse processo reduz o volume e a toxicidade dos rejeitos finais, além de fechar o ciclo do combustível nuclear.

- Reaproveitamento de combustíveis: resíduos de alta atividade gerados em reatores de segunda e terceira geração podem ser reutilizados como combustível nos Gen IV, transformando passivos ambientais em recursos energéticos.
- Redução da vida média dos rejeitos: resíduos remanescentes apresentam tempo de confinamento reduzido de centenas de milhares para algumas centenas de anos.
- Combustíveis com melhor comportamento pós-uso: em reatores de sais fundidos (MSRs), os resíduos permanecem dissolvidos no refrigerante líquido e podem ser separados continuamente, evitando o acúmulo de materiais altamente radiotóxicos.

Embora ainda existam desafios técnicos, como a complexidade do reprocessamento e a necessidade de infraestrutura específica, os avanços em curso reforçam a sustentabilidade da energia nuclear no longo prazo, tornando-a mais competitiva e ambientalmente responsável.

Após a descrição dos principais tipos de reatores de quarta geração, torna-se relevante sintetizar suas características em termos de refrigerante, faixa de temperatura de operação e benefícios ambientais.

A tabela 2 apresenta um comparativo das tecnologias analisadas, destacando seus potenciais no contexto da sustentabilidade energética.

Tabela 2 - Reatores de IV geração e suas características.

| Tipo de reator | Refrigerante Principal | Faixa de temperatura de operação | Principais benefícios ambientais e operacionais |
|--|--------------------------|----------------------------------|--|
| PBMR - Reator Modular de Leito de Esferas | Hélio (gás inerte) | 750-950 °C | Alta segurança intrínseca; combustível encapsulado resistente a altas temperaturas; ausência de risco de fusão; adequado para cogeração e produção de calor industrial sem emissões. |
| SFR - Reator Rápido Resfriado a Sódio | Sódio líquido | 500-600 °C | Capacidade de queimar resíduos nucleares de longo prazo (plutônio e actínidos menores); fechamento do ciclo do combustível; elevada densidade energética. |
| MSR - Reator de Sais Fundidos | Mistura de sais fundidos | 600-700 °C | Operação em baixa pressão; elevada segurança; resíduos dissolvidos no refrigerante com possibilidade de separação contínua; baixo impacto hídrico por não utilizar água no resfriamento. |
| GFR - Reator Rápido a Gás | Hélio (gás inerte) | 850-1000 °C | Produção de hidrogênio e calor industrial de alta temperatura; alta eficiência energética; potencial de substituir processos industriais intensivos em carbono. |
| VHTR - Reator de Alta Temperatura Refrigeração a Gás | Hélio (gás inerte) | 900-1000 °C | Produção eficiente de hidrogênio por eletrólise de alta temperatura; aplicações em setores industriais pesados; elevada eficiência termodinâmica |

Fonte: elaborado pelo autor (2025), com base em GIF (2023), IAEA (2023), WNA (2023) e CNEN (2023).

A análise comparativa apresentada na Tabela 2 evidencia que os reatores de quarta geração compartilham avanços significativos em relação às gerações anteriores, sobretudo na segurança intrínseca, no aproveitamento mais eficiente do combustível e na redução do passivo ambiental associado aos resíduos radioativos. Tecnologias como os SFRs e MSRs se destacam pela capacidade de reaproveitar combustíveis já utilizados, reduzindo a vida útil radiotóxica dos rejeitos. Já os GFRs e VHTRs, ao operarem em temperaturas extremamente elevadas, abrem novas possibilidades para a

produção de hidrogênio limpo e para aplicações industriais de alta demanda energética, ampliando o alcance da energia nuclear além da geração elétrica. Dessa forma, os reatores de quarta geração não apenas reforçam a contribuição da energia nuclear para a redução das emissões de poluentes atmosféricos, mas também posicionam essa tecnologia como elemento central em uma transição energética sustentável e de longo prazo.

6.3 PERSPECTIVA PARA O BRASIL

Embora o Brasil ainda não opere reatores de quarta geração, o país desenvolve pesquisas estratégicas conduzidas principalmente pelo IPEN e pela CNEN. O IPEN realiza estudos termohidráulicos, pesquisas de segurança e investigações sobre reatores avançados, como os de sal fundido e refrigerados a gás, além de explorar combustíveis alternativos como o tório. A CNEN, por meio de centros como o CDTN, conduz experimentos com combustíveis avançados, reprocessamento e soluções para reaproveitamento de rejeitos em reatores rápidos. O Brasil também participa de colaborações internacionais, incluindo o Generation IV International

Forum, e mantém parcerias científicas com instituições da França, China e Estados Unidos, ampliando sua inserção no cenário nuclear global. O país dispõe de vantagens estratégicas, como a sexta maior reserva de urânio do mundo e as maiores reservas conhecidas de tório, além de infraestrutura técnica consolidada, exemplificada pelo Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), que fortalece competências em engenharia e segurança nuclear. Planos energéticos nacionais, como o PDE 2032, já incluem a possibilidade de expansão da geração nuclear, embora dependam de investimentos em enriquecimento, reprocessamento e marcos regulatórios. O aproveitamento futuro do tório surge como oportunidade singular, podendo posicionar o Brasil como referência em reatores avançados. Contudo, a ampliação dessa tecnologia exige superar desafios de aceitação pública, reforçando a necessidade de iniciativas de comunicação e educação científica para consolidar a nuclear como alternativa segura, sustentável e estratégica.

7 SUSTENTABILIDADE

A análise da sustentabilidade energética requer a consideração conjunta dos impactos ambientais, do uso eficiente de recursos naturais, da durabilidade das infraestruturas e da viabilidade econômica ao longo do tempo. Com esse propósito, foi realizado um estudo comparativo entre três tecnologias de geração elétrica: um reator nuclear de quarta geração, uma usina termelétrica a carvão mineral e uma usina a gás natural, avaliando desempenho ambiental, técnico e econômico ao longo de até 80 anos. A escolha do carvão e do gás natural deve-se ao fato de serem duas das principais fontes fósseis ainda utilizadas no Brasil, responsáveis por aproximadamente 47.359 GWh/ano, além

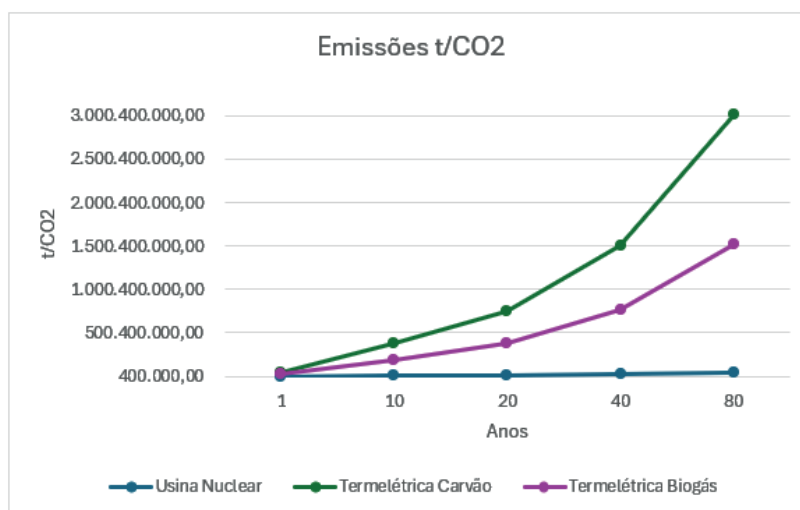
de apresentarem elevados níveis de emissões de CO₂, NO_x e SO₂, configurando importantes contribuintes para o aquecimento global e para doenças associadas à poluição atmosférica.

O objetivo central do comparativo é evidenciar os benefícios potenciais da substituição gradual dessas fontes fósseis pela energia nuclear, demonstrando que, embora os reatores apresentem custos iniciais mais elevados, possuem custos operacionais menores, baixo consumo de combustível e emissões quase nulas durante a operação, proporcionando melhor desempenho ambiental e maior estabilidade econômica em longo prazo. As fontes renováveis intermitentes, embora de baixíssimas emissões, não foram incluídas no comparativo técnico direto devido às suas limitações de variabilidade climática e necessidade de armazenamento, sendo consideradas complementares à nuclear. A energia nuclear, como fonte despachável e de baixa emissão, oferece suporte contínuo às renováveis, evitando o acionamento de termelétricas fósseis e contribuindo para uma matriz elétrica mais limpa e estável.

Os custos de construção das três tecnologias foram escalonados para uma geração anual equivalente de 47.359 GWh, resultando em R\$ 294,6 bilhões para a usina nuclear, R\$ 176,8 bilhões para a usina a carvão e R\$ 98,2 bilhões para a usina a gás natural, com base em dados da EPE (2024), IEA (2023) e no câmbio médio de R\$ 5,45 por dólar (BCB, 2025). A partir desses valores, elaborou-se o Quadro 3, contendo emissões acumuladas, consumo e custo de combustível, além do lucro líquido projetado para 1, 10, 20, 40 e 80 anos, permitindo uma avaliação integrada de sustentabilidade e desempenho econômico entre as tecnologias analisadas.

O Gráfico 1 apresenta a evolução das emissões acumuladas de dióxido de carbono (CO₂) das três fontes de geração de energia analisadas, usina nuclear de quarta geração, termelétrica a carvão e termelétrica a gás natural, ao longo dos horizontes temporais de 1, 10, 20, 40 e 80 anos, mantendo constante a geração anual de 47.359 GWh, valor correspondente à soma da energia elétrica gerada no Brasil em 2023 pelas usinas movidas a carvão e a gás natural (EPE, 2024).

Gráfico 1 - Emissões acumuladas de CO₂ em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da EPE (2024), CNEN (2023), IAEA (2023) e WNA (2024).

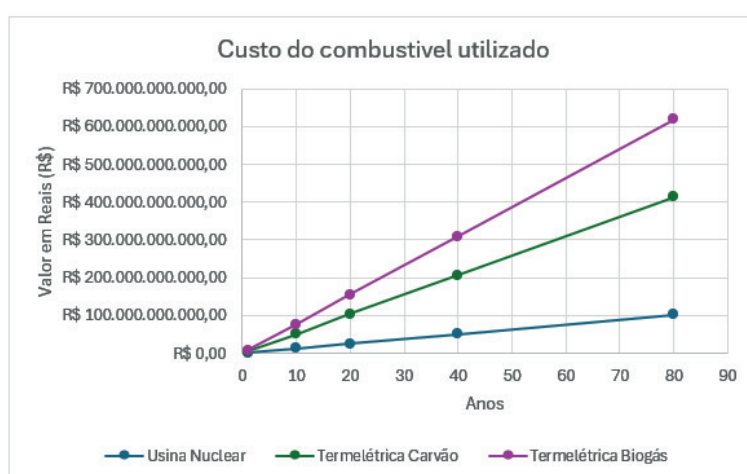
Observa-se que as usinas termelétricas fósseis apresentam um crescimento exponencial das emissões de CO₂ com o passar dos anos, refletindo o impacto contínuo da queima de combustíveis fósseis. As termelétricas a carvão, em especial, atingem valores superiores a 3 bilhões de toneladas de CO₂ após 80 anos de operação, representando o maior potencial poluidor entre as fontes comparadas. As usinas a biogás, embora emitam menos poluentes que o carvão, ainda apresentam níveis significativamente elevados de emissões cumulativas, alcançando cerca de 1,5 bilhão de toneladas de CO₂ no mesmo período.

Em contrapartida, a usina nuclear demonstra emissões praticamente estáveis e insignificantes em relação às demais fontes, com valores inferiores a 40 milhões de toneladas de CO₂ ao longo de 80 anos, o que representa uma redução superior a 99% nas emissões comparadas às termelétricas convencionais. Esse resultado evidencia o potencial da energia nuclear como uma fonte de baixo carbono, alinhada aos compromissos globais de descarbonização e à mitigação das mudanças climáticas (IAEA, 2023; IPCC, 2022).

A diferença observada entre as curvas demonstra claramente o efeito cumulativo das fontes fósseis, cujo impacto ambiental se intensifica com o tempo, contrastando com a estabilidade e previsibilidade do desempenho ambiental nuclear, que se mantém praticamente constante ao longo de décadas de operação.

O Gráfico 2 apresenta a variação do custo acumulado do combustível ao longo do tempo para as três fontes energéticas analisadas, usina nuclear, termelétrica a carvão e termelétrica a biogás, considerando a mesma geração anual de 47.359 GWh. Esse parâmetro foi adotado com base na produção combinada das termelétricas brasileiras movidas a carvão e gás natural no ano de 2023, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024).

Gráfico 2 - Custo acumulado do combustível utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da EPE (2024), CNEN (2023), IAEA (2023) e WNA (2024).

Observa-se que o custo do combustível é o fator que mais diferencia economicamente as tecnologias de geração. As usinas termelétricas a biogás e a carvão apresentam crescimento contínuo e

acentuado desse custo ao longo do tempo, resultado do consumo elevado de combustível para manter a produção de energia. Após 80 anos de operação, o gasto acumulado com combustível dessas fontes ultrapassa R\$ 600 bilhões no caso do biogás e R\$ 400 bilhões para o carvão, valores que comprometem a viabilidade econômica de longo prazo dessas tecnologias.

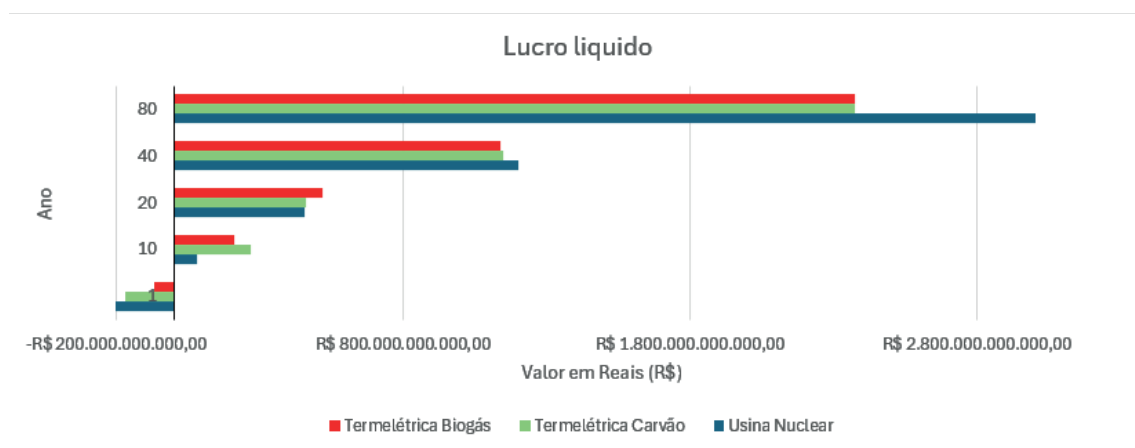
Em contrapartida, a usina nuclear apresenta um custo de combustível consideravelmente menor, mesmo em períodos prolongados de operação. Isso se deve à alta densidade energética do urânio, capaz de gerar grande quantidade de eletricidade com pequenas massas de material combustível, e à estabilidade do preço do urânio no mercado internacional, que tende a variar menos do que os combustíveis fósseis (WNA, 2024; IAEA, 2023).

Esses resultados evidenciam que, embora o investimento inicial de uma usina nuclear seja elevado, sua manutenção e operação a longo prazo tornam-se financeiramente vantajosas, resultando em custos totais inferiores quando comparados às fontes fósseis. Além disso, os menores custos de combustível contribuem para reduzir a volatilidade tarifária, favorecendo a estabilidade econômica e energética do sistema elétrico nacional.

Dessa forma, o Gráfico 2 reforça o argumento de que a energia nuclear não apenas é ambientalmente sustentável, como também economicamente eficiente no longo prazo, especialmente quando se consideram horizontes de operação superiores a 20 anos, o que coincide com a vida útil típica das usinas nucleares modernas.

O Gráfico 3 apresenta a evolução do lucro líquido acumulado das três fontes de geração, usina nuclear de quarta geração, termelétrica a carvão e termelétrica a biogás, ao longo de 1, 10, 20, 40 e 80 anos de operação, considerando uma geração constante de 47.359 GWh por ano. O cálculo do lucro líquido foi realizado com base na relação entre o custo total de construção, o tempo de retorno do investimento (payback) e os custos acumulados de combustível, conforme parâmetros apresentados na Tabela 1 e no Quadro 1 deste trabalho.

Gráfico 3 - Lucro líquido acumulado das fontes de geração elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da EPE (2024), CNEN (2023), IAEA (2023) e WNA (2024).

Nos primeiros anos de operação, as usinas termelétricas fósseis demonstram um retorno financeiro mais rápido, devido ao menor investimento inicial e ao curto período de payback (cerca de 2,5 anos para o biogás e 4,5 anos para o carvão). No entanto, esse ganho inicial é progressivamente reduzido ao longo do tempo em razão do aumento constante dos custos de combustível, da instabilidade de preços e da necessidade de manutenção intensiva dessas plantas. A partir de horizontes superiores a 20 anos, nota-se uma desaceleração significativa do lucro acumulado nas fontes fósseis.

Em contrapartida, a usina nuclear apresenta menor lucratividade nos primeiros anos, consequência de seu investimento inicial elevado e de um payback mais longo (7,6 anos). Contudo, à medida que a operação se prolonga, os baixos custos de combustível e manutenção tornam-se determinantes, fazendo com que o lucro líquido acumulado da usina nuclear ultrapasse o das demais fontes em períodos superiores a 40 anos de funcionamento. Após 80 anos, a energia nuclear demonstra o maior retorno financeiro líquido, aliado a impactos ambientais significativamente menores.

Esse comportamento evidencia um dos pilares centrais da sustentabilidade energética: a capacidade de uma tecnologia manter-se economicamente viável e ambientalmente responsável no longo prazo. Enquanto as termelétricas fósseis dependem de insumos caros e poluentes, a energia nuclear consolida-se como uma fonte de alto retorno e baixo carbono, garantindo segurança energética, estabilidade econômica e redução de emissões, elementos fundamentais para a transição energética e o cumprimento das metas de neutralidade climática estabelecidas por acordos internacionais, como o Acordo de Paris (ONU, 2015).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida neste trabalho evidenciou, de forma clara e quantitativa, as vantagens ambientais, econômicas e energéticas da energia nuclear em relação às fontes fósseis, especialmente o carvão mineral e o gás natural, principais responsáveis pelas emissões de poluentes atmosféricos no setor elétrico. Os resultados obtidos permitiram compreender com maior profundidade a dimensão dos impactos causados pelas fontes fósseis e o potencial transformador da tecnologia nuclear em uma matriz elétrica mais sustentável.

Os gráficos apresentados reforçam essas conclusões, o Gráfico 1, referente às emissões acumuladas de CO₂, demonstra que as termelétricas fósseis apresentam crescimento exponencial das emissões ao longo do tempo, alcançando valores bilionários após 80 anos, enquanto a energia nuclear mantém níveis praticamente constantes e até centenas de vezes inferiores. Essa diferença evidencia o papel estratégico da energia nuclear na mitigação das mudanças climáticas e na redução da poluição atmosférica, diretamente relacionada ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. No Gráfico 2, observa-se que o custo acumulado de combustível das fontes fósseis aumenta continuamente, influenciado pela volatilidade dos preços internacionais e pela necessidade de abastecimento constante. Em contraste, a energia nuclear demonstra estabilidade econômica, com custos de

combustível até cinco vezes menores, resultado da alta densidade energética do urânio e da maior previsibilidade do seu mercado global. O Gráfico 3, que trata do lucro líquido acumulado, mostra que embora as termelétricas fósseis apresentem retorno financeiro inicial mais rápido, a energia nuclear supera ambas após aproximadamente 40 anos de operação. Isso ocorre devido à longa vida útil dos reatores, ao baixo custo de operação e ao reduzido consumo de combustível, proporcionando maior lucratividade no longo prazo.

Com base no estudo realizado, conclui-se que a energia nuclear, especialmente os reatores de quarta geração, representa uma das alternativas mais promissoras para substituir progressivamente as fontes fósseis que mais degradam o meio ambiente. A análise permitiu compreender que a nuclear não apenas reduz drasticamente as emissões atmosféricas, mas também apresenta desempenho econômico robusto, maior estabilidade na produção de energia e benefícios logísticos e ambientais decorrentes da sua altíssima densidade energética.

Além disso, os resultados indicam que a energia nuclear não deve ser vista como concorrente das fontes renováveis, mas como complemento indispensável para garantir estabilidade ao sistema elétrico, reduzindo a dependência de termelétricas fósseis nos momentos de baixa geração de solar e eólica.

Portanto, os resultados indicam que a ampliação da energia nuclear no Brasil é não apenas viável, mas necessária para assegurar segurança energética, cumprir metas de descarbonização e promover um modelo de desenvolvimento alinhado aos princípios da sustentabilidade. Defendo que políticas públicas consistentes, investimentos contínuos em tecnologia e comunicação transparente com a sociedade são fundamentais para consolidar a energia nuclear como protagonista da transição energética nacional.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Qualidade do ar e saúde**. Brasília, DF: ANVISA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa>. Acesso em: 15 out. 2024.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Taxa de câmbio média - 2025**. Brasília, DF: BCB, 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resoluções ambientais - 2023**. Brasília, DF: CONAMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/conama>. Acesso em: 10 out. 2024.
- BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Relatórios de qualidade ambiental**. Brasília, DF: IBAMA, 2024. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br>. Acesso em: 12 nov. 2024.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Informações técnicas sobre energia nuclear - 2023**. Rio de Janeiro: CNEN, 2023. Disponível em: <https://www.cnem.gov.br>. Acesso em: 5 set. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional - 2023**: ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 14 ago. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Série de dados sobre geração elétrica - 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 10 jan. 2025.

GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM (GIF). **Technology Roadmap - 2023**. [S. l.]: GIF, 2023. Disponível em: <https://www.gen-4.org>. Acesso em: 22 set. 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Emissões atmosféricas no setor energético brasileiro**. São Paulo: IEMA, 2024. Disponível em: <https://www.iema.org.br>. Acesso em: 18 out. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Assessment Report 2022**. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 3 set. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change Report 2023**: synthesis report. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch>. Acesso em: 20 ago. 2024.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Nuclear Energy Series - 2023**. Vienna: IAEA, 2023. Disponível em: <https://www.iaea.org>. Acesso em: 30 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2022**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 15 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Acordo de Paris**. Paris: ONU, 2015. Disponível em: <https://www.un.org>. Acesso em: 12 nov. 2024.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). **Nuclear Fuel Cycle Insights - 2024**. London: WNA, 2024. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org>. Acesso em: 20 jan. 2025.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (WNA). **Nuclear Performance Report - 2023**. London: WNA, 2023. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org>. Acesso em: 14 out. 2024.