



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

STONI DINIZ FERRAZ RIBEIRO FILHO

ENERGIA NUCLEAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Recife
2025

Autor(a): _____

Stoni Diniz Ferraz Ribeiro Filho

ENERGIA NUCLEAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

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

Universidade Federal de Pernambuco

Recife

2025

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

Ribeiro Filho, Stoni Diniz Ferraz.

Energia nuclear e transição energética / Stoni Diniz Ferraz Ribeiro Filho. -
Recife, 2025.

39 : il.

Orientador(a): Jair De Lima Bezerra

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

Inclui referências.

1. Energia Nuclear. 2. Transição Energetica. 3. Pequenos reatores modulares.
4. Matriz energética. I. Bezerra, Jair De Lima. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

STONI DINIZ FERRAZ RIBEIRO FILHO

ENERGIA NUCLEAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

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: 08/04/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Costa
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Daniel González
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

A energia nuclear tem se destacado como uma alternativa estratégica no contexto da transição energética global, especialmente diante da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa sem comprometer a segurança energética. Este trabalho, classificado como uma análise bibliográfica com estudo de caso, investiga a viabilidade técnico-econômica e ambiental da energia nuclear no Brasil em comparação às fontes fósseis, com ênfase na análise do Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) aplicado às tecnologias nuclear, a gás natural e a carvão. Foram utilizados parâmetros reais de investimento, operação e combustível, considerando uma taxa de desconto de 8% compatível com o contexto econômico brasileiro. Os resultados demonstram que, apesar do elevado custo inicial (CAPEX), a energia nuclear apresenta um LCOE competitivo em relação às fontes fósseis quando se considera sua longa vida útil e baixa emissão de carbono. A pesquisa também aborda os desafios regulatórios, ambientais e sociais para a expansão dessa fonte no Brasil, destacando os Pequenos Reatores Modulares (SMRs) como alternativa viável para diversificar a matriz energética com flexibilidade e menor impacto territorial. Os dados analisados reforçam o potencial da energia nuclear como componente complementar às fontes renováveis intermitentes, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico nacional. O estudo conclui que políticas públicas adequadas, financiamento de longo prazo e fortalecimento da aceitação social são fundamentais para a ampliação do uso da energia nuclear em um cenário de transição energética sustentável.

Palavras-chave: energia nuclear; transição energética; LCOE; fontes fósseis; Pequenos Reatores Modulares; matriz energética.

ABSTRACT

Nuclear energy has emerged as a strategic alternative in the context of global energy transition, especially in light of the urgent need to reduce greenhouse gas emissions without compromising energy security. This work, categorized as a bibliographic analysis with a case study, investigates the technical, economic, and environmental feasibility of nuclear energy in Brazil compared to fossil fuel sources, with an emphasis on the Levelized Cost of Electricity (LCOE) for nuclear, natural gas, and coal technologies. Real parameters for investment, operation, and fuel were used, considering an 8% discount rate that reflects Brazil's economic conditions. The results show that despite its high initial capital expenditure (CAPEX), nuclear energy presents a competitive LCOE when its long operational lifespan and low carbon emissions are taken into account. The research also addresses regulatory, environmental, and social challenges for the expansion of this energy source in Brazil, highlighting Small Modular Reactors (SMRs) as a viable alternative to diversify the energy mix with greater flexibility and reduced territorial impact. The data reinforce the potential of nuclear energy as a complementary component to intermittent renewable sources, contributing to the stability of the national electric system. The study concludes that adequate public policies, long-term financing, and strengthened public acceptance are key to expanding nuclear energy use in a sustainable transition scenario.

Keywords: nuclear energy; energy transition; LCOE; fossil fuels; Small Modular Reactors; energy mix.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. CONCEITOS PRELIMINARES.....	9
2.1. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE).....	9
2.2. CUSTO NIVELADO DE ELETRICIDADE (LCOE).....	10
2.3. MODULARIZAÇÃO.....	10
2.4. LICENCIAMENTO AMBIENTAL.....	10
2.5. MATRIZ ENERGÉTICA.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ENUNCIADO DO PROBLEMA.....	11
3.1. ASPECTOS TÉCNICOS, AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS LIGADOS À ENERGIA NUCLEAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	12
3.1.1. Evolução da energia nuclear na transição energética global.....	13
3.1.2. Aspectos fundamentais da transição energética.....	17
3.1.2.1. O papel do Brasil na transição energética global.....	17
3.1.2.2. Infraestrutura energética e desafios da modernização.....	18
3.2. CENÁRIOS FUTUROS PARA A INCLUSÃO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL A PARTIR DAS ESPECIFICIDADES DO SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL E OPORTUNIDADES E DESAFIOS RELACIONADOS À ENERGIA NUCLEAR NO PROCESSO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	19
3.2.1. Evolução da energia nuclear: contribuições e desafios na matriz energética global.....	20
3.2.2. Pequenos Reatores Modulares (SMRs): Uma Revolução na Energia Nuclear para um Futuro Sustentável.....	25
4. METODOLOGIA.....	28
5. ESTUDO DE CASO.....	29
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

A energia nuclear, embora envolta em debates sobre segurança e impactos ambientais, apresenta vantagens notáveis, como alta densidade energética, fornecimento contínuo e baixa emissão de carbono durante a operação. Tais atributos a tornam uma alternativa promissora frente à crescente participação de fontes intermitentes, como solar e eólica, que exigem respaldo por tecnologias despacháveis e confiáveis (IMMICH et al., 2023). No entanto, permanece a necessidade de avaliar sua viabilidade econômica em termos concretos, especialmente no Brasil, onde os custos de capital e a estrutura do sistema elétrico impõem desafios específicos (FORTES, 2024).

Dessa forma, a necessidade de realizar uma transição energética eficiente e sustentável tem se intensificado em razão dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, pela crescente demanda por eletricidade e pelas pressões geopolíticas e econômicas globais. Esse processo, que historicamente envolveu a substituição progressiva de fontes de energia — da biomassa ao carvão, depois ao petróleo e gás natural —, agora se orienta pela busca de alternativas de baixo carbono que garantam segurança no suprimento e viabilidade econômica (LOSEKANN; TAVARES, 2019).

Nesse contexto, o presente trabalho parte da premissa de que avaliar a competitividade das tecnologias disponíveis é etapa fundamental para embasar decisões estratégicas em políticas públicas, planejamento energético e investimentos. Assim, adota-se como estudo de caso uma análise do Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) — expresso em reais (R\$) — de três fontes energéticas: gás natural, carvão e energia nuclear. A proposta visa comparar seus custos totais ao longo do ciclo de vida e sua contribuição potencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), no contexto da transição energética brasileira.

Com base nesse problema, o objetivo geral deste trabalho é discutir os aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais relacionados à energia nuclear no contexto da transição energética, com ênfase na análise comparativa de custos e emissões frente a outras fontes fósseis. A metodologia adotada parte de uma revisão bibliográfica ampla e culmina em um estudo de caso empírico, no qual são

calculados os valores de LCOE para cada tecnologia com base em parâmetros reais de investimento, operação, combustível e vida útil, considerando também uma taxa de desconto compatível com o cenário brasileiro.

Socialmente, essa abordagem contribui para o debate sobre opções energéticas mais equilibradas entre custo e sustentabilidade, fornecendo subsídios para escolhas informadas por parte de governos, empresas e sociedade civil (FERREIRA; MACHADO, 2021). Academicamente, o trabalho se propõe a oferecer uma análise quantitativa fundamentada, capaz de ampliar o conhecimento interdisciplinar sobre o papel da energia nuclear em sistemas energéticos sustentáveis (JANNUZZI, 2024). Profissionalmente, os resultados obtidos visam apoiar decisões em um setor marcado por alta complexidade regulatória, forte pressão ambiental e necessidade crescente de segurança energética (FERNANDES et al., 2021).

Diante desse contexto, a energia nuclear desponta como uma alternativa que apresenta baixa emissão de gases de efeito estufa e alta capacidade de geração estável. No entanto, questões relacionadas aos custos envolvidos na implementação e manutenção dessa tecnologia, especialmente em comparação com outras fontes energéticas, permanecem centrais para avaliar sua viabilidade no cenário brasileiro (FORTES, 2024). Dessa forma, o estudo partirá do seguinte problema de pesquisa: quais são os custos econômicos e ambientais da energia nuclear em comparação a outras fontes energéticas, considerando sua contribuição potencial para a redução de emissões de gases de efeito estufa na transição energética?

2. CONCEITOS PRELIMINARES

2.1. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

As emissões de gases de efeito estufa consistem na liberação de substâncias como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) na atmosfera, que têm a capacidade de reter calor e intensificar o efeito estufa natural da Terra. Essas emissões são causadas principalmente pela queima de combustíveis fósseis em processos industriais, geração de energia e transporte. Assim, o aumento das emissões está diretamente associado às mudanças climáticas, sendo responsável

pelo aquecimento global e seus impactos, como aumento do nível do mar e eventos climáticos extremos (DEBASTIANI; SENGGER, 2024).

No contexto da transição energética, a redução das emissões de GEE é uma meta prioritária, com o objetivo de substituir fontes de energia intensivas em carbono por opções mais limpas e sustentáveis, como energia nuclear e renováveis (PIMENTEL, 2023).

2.2. CUSTO NIVELADO DE ELETRICIDADE (LCOE)

O LCOE, ou Custo Nivelado de Eletricidade, é um indicador financeiro amplamente utilizado para medir o custo médio por unidade de energia gerada ao longo do ciclo de vida de uma instalação de geração de eletricidade. Ele considera todos os custos relacionados, como investimento inicial, operação, manutenção e combustível, bem como a vida útil do projeto e a quantidade de energia gerada. No caso da energia nuclear, o LCOE é uma ferramenta importante para comparar sua competitividade econômica em relação a fontes fósseis, como gás natural e carvão, e a renováveis, como solar e eólica (DIAS et al., 2024).

Dessa forma, a análise do LCOE fornece uma base para decisões de investimento, ajudando a identificar a viabilidade econômica das tecnologias disponíveis no contexto da transição energética (JANNUZZI, 2024).

2.3. MODULARIZAÇÃO

A modularização é uma abordagem de construção que consiste em dividir um projeto em unidades ou módulos menores, que são fabricados em locais controlados, transportados e montados no local final de operação. Na área de energia nuclear, essa técnica é aplicada aos Reatores Modulares Pequenos (SMRs), que representam uma inovação tecnológica para reduzir custos, prazos de construção e riscos associados (IMMICH et al., 2023). Os módulos são projetados para serem altamente padronizados e fáceis de integrar, permitindo maior flexibilidade no planejamento energético e viabilizando o uso de energia nuclear em regiões com menor demanda energética. Além disso, a modularização contribui para o controle de qualidade, ao permitir que os componentes sejam fabricados em

ambientes controlados e inspecionados antes da instalação (FORTES, 2024).

2.4. LICENCIAMENTO AMBIENTAL

O licenciamento ambiental é um processo regulamentado que tem como objetivo avaliar e autorizar a construção e operação de empreendimentos que possam causar impactos ao meio ambiente, como usinas de energia. Dessa forma, destaca-se que, no caso da energia nuclear, o licenciamento é ainda mais rigoroso devido aos potenciais riscos associados, exigindo análises detalhadas de segurança, monitoramento contínuo e conformidade com normas internacionais (JABORANDY; CAVALCANTE; VIEIRA JÚNIOR, 2024).

Esse processo inclui diversas etapas, como estudos de impacto ambiental (EIA), audiências públicas para consulta à sociedade, e a emissão de licenças específicas que autorizam a instalação e operação. Assim sendo, frisa-se que o licenciamento ambiental é fundamental para garantir que as usinas nucleares sejam construídas e operadas com o mínimo de impacto ambiental e máximo de segurança para a população e o ecossistema (WICKERT; JÚNIOR ARAÚJO, 2024).

2.5. MATRIZ ENERGÉTICA

A matriz energética representa o conjunto de fontes de energia utilizadas por um país ou região para atender à sua demanda por eletricidade, aquecimento e transporte. Ela é composta por fontes renováveis, como solar, eólica, hidráulica e biomassa, e não renováveis, como carvão, petróleo, gás natural e energia nuclear. A diversificação da matriz é essencial para aumentar a segurança energética, reduzir a dependência de fontes externas e mitigar os impactos ambientais (CARVALHO, 2024).

Nessa perspectiva, a inclusão da energia nuclear na matriz energética é amplamente discutida por seu potencial de oferecer uma fonte de energia de base confiável, com baixa emissão de carbono, que complementa as renováveis intermitentes. A análise da matriz energética permite identificar desafios e oportunidades na transição para sistemas mais sustentáveis e resilientes, alinhados aos compromissos globais de redução de emissões de gases de efeito estufa

(KORZENIEWICZ, 2021).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ENUNCIADO DO PROBLEMA

As transições energéticas ao longo da história evidenciam como as sociedades adaptaram suas matrizes energéticas a mudanças tecnológicas, econômicas e ambientais. A atual transição energética, impulsionada pela urgência de mitigar os impactos das mudanças climáticas, exige a substituição de fontes fósseis por tecnologias mais limpas e sustentáveis. Nesse contexto, elementos como o desenvolvimento de novas tecnologias de energia, a modernização da infraestrutura, reformas institucionais e modelos financeiros inovadores são cruciais (FERNANDES et al., 2021).

Dessa forma, a energia nuclear surge como uma alternativa viável por sua capacidade de fornecer energia de base com baixa emissão de gases de efeito estufa, mas questões relacionadas a custos, segurança e aceitação social continuam sendo desafios significativos. Embora a energia nuclear já seja amplamente utilizada em países como Estados Unidos, França e China, seu papel na transição energética global e em países emergentes, como o Brasil, requer análises detalhadas (SIQUEIRA 2024).

Assim, é necessário investigar como os custos dessa tecnologia, associados a indicadores como emissões de carbono e aceitação social, influenciam sua viabilidade em comparação com outras fontes (IMMICH et al., 2023). Portanto, o problema central deste estudo reside na compreensão de como a energia nuclear pode ser integrada à matriz energética brasileira, considerando aspectos econômicos, ambientais e sociais no contexto da transição energética.

3.1. ASPECTOS TÉCNICOS, AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E SOCIAIS LIGADOS À ENERGIA NUCLEAR E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O estudo abordará as diversas transições energéticas ao longo da história, destacando o contexto atual que demanda uma transição energética urgente para fontes mais limpas e sustentáveis. Serão explorados os elementos essenciais desse processo, como as tecnologias de energia, a modernização da infraestrutura física para fornecimento e uso de energia, as reformas institucionais e regulatórias

necessárias e os modelos de financiamento e negócios que viabilizam essa transformação, conforme discutido por Immich et al. (2023) e Fernandes et al. (2021).

Além disso, será apresentado um breve histórico da energia nuclear, com ênfase em aspectos ambientais, segurança, monitoramento e licenciamento ambiental, comparando essa fonte com outras alternativas energéticas em termos de impacto e eficiência.

3.1.1. Evolução da energia nuclear na transição energética global

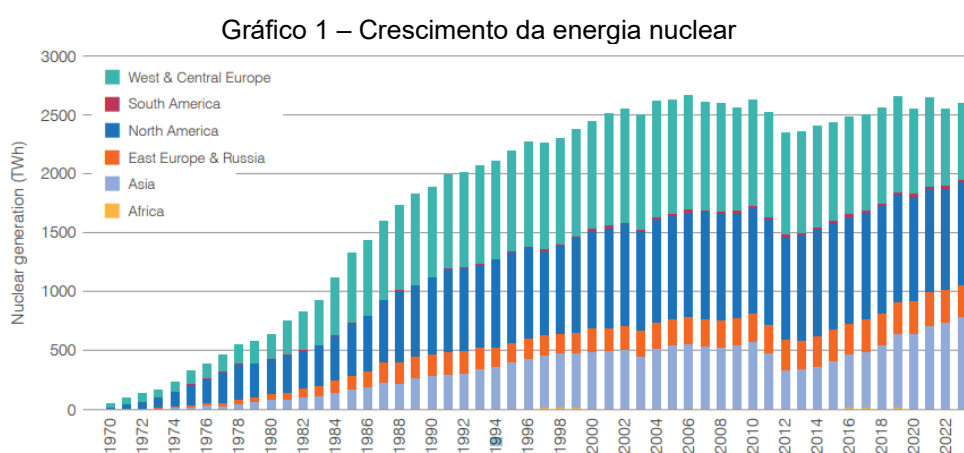
Ao longo do tempo, a civilização passou por diversas transformações em suas fontes de energia, marcadas por mudanças progressivas na composição das matrizes energéticas, a fim de atender às demandas de calor, iluminação e força motriz. Essas mudanças, historicamente, ocorreram quando uma fonte primária foi gradualmente substituída por outra mais eficiente e adequada às necessidades emergentes. Exemplos emblemáticos incluem a troca da lenha pelo carvão durante a Revolução Industrial e, mais recentemente, a ascensão do petróleo como combustível predominante (LOSEKANN; TAVARES, 2019).

Tal cenário impulsionou a eletricidade como uma fonte secundária essencial para os sistemas modernos. Essas transições, porém, não ocorrem de forma linear. Choques externos, como crises de suprimento ou aumentos significativos nos preços de recursos energéticos, desempenham papel decisivo na aceleração dessas mudanças. Ao mesmo tempo, inovações tecnológicas e soluções disruptivas que oferecem maior eficiência, menores custos e maior conforto destacam-se como catalisadores no abandono de fontes menos viáveis (LOSEKANN; TAVARES, 2019).

Além disso, o processo de transição energética também influencia diretamente as estruturas econômicas de nações e regiões, moldando suas políticas e prioridades. Fatores ambientais e sociais, como a necessidade de reduzir impactos ambientais e atender às demandas de sustentabilidade, desempenham papéis igualmente cruciais. Exemplos históricos incluem o avanço e a posterior desaceleração da energia nuclear em alguns países, a expansão de usinas hidrelétricas no Brasil e a adoção de biocombustíveis provenientes da cana-de-

açúcar como uma alternativa energética estratégica (JANNUZZI, 2024).

Nessa perspectiva, o Gráfico 1 ilustra a evolução da geração de energia nuclear ao longo de cinco décadas, destacando as contribuições regionais e a expansão global da tecnologia. A produção mundial atingiu um pico de mais de 2.500 TWh em 2022, demonstrando a relevância da energia nuclear no fornecimento de eletricidade de base:



Fonte: World Nuclear Association, 2024, p. 4)

A partir do Gráfico 1, observa-se que a América do Norte manteve a liderança na geração de eletricidade nuclear por grande parte do período analisado, sendo responsável por uma parcela significativa da produção total. A Europa Ocidental e Central também se destacou, com um crescimento rápido até os anos 1990, seguido por uma estabilização devido a políticas de descomissionamento em países como Alemanha e Suíça. Já a Ásia exibiu o crescimento mais notável nas últimas décadas, impulsionado por programas de expansão nuclear em países como China, Índia e Coreia do Sul (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

O restante do mundo, incluindo a América do Sul e a África, ainda apresenta participações marginais na geração nuclear. Sob o ponto de vista técnico, a energia nuclear oferece vantagens como alta densidade energética e geração contínua, sendo especialmente útil para complementar fontes intermitentes como solar e

eólica. No campo ambiental, ela desempenha um papel fundamental na redução de emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para mitigar as mudanças climáticas (FERREIRA; MACHADO, 2021).

Contudo, desafios relacionados aos custos elevados de construção, gerenciamento de resíduos radioativos e questões de segurança permanecem como obstáculos significativos para sua expansão global. No aspecto econômico, a competitividade da energia nuclear varia entre regiões, dependendo de fatores como subsídios governamentais, custo de financiamento e regulamentações locais. Socialmente, a aceitação pública da tecnologia nuclear é altamente influenciada por questões culturais, históricas e de percepção de risco, especialmente em regiões que sofreram com acidentes nucleares no passado (FERREIRA; MACHADO, 2021).

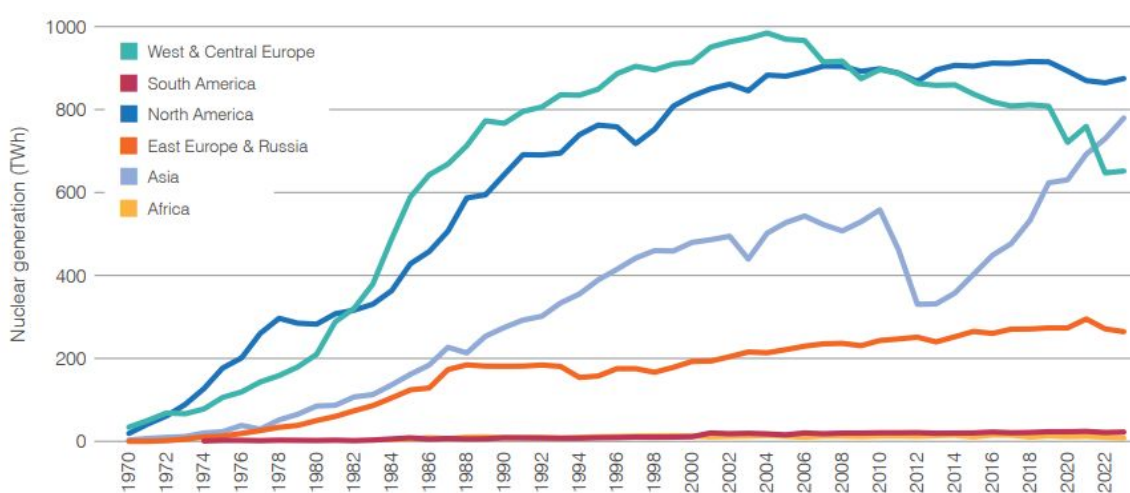
Assim, o Gráfico 1 destaca a importância de uma abordagem regionalizada para entender as particularidades da adoção nuclear na transição energética global. Assim, observa-se que as transformações no uso de energia vão além do setor de produção de combustíveis e eletricidade, abrangendo mudanças significativas nos padrões de consumo final. Tecnologias que alteram rapidamente o comportamento dos usuários, como o avanço das lâmpadas LED na iluminação, exemplificam como inovações no consumo final influenciam o ritmo das transições energéticas.

Outro ponto crucial é o papel crescente da digitalização, que não apenas integra setores energéticos e de telecomunicações, mas também possibilita maior flexibilidade na operação do sistema energético. Isso favorece a integração de fontes renováveis intermitentes, o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento, o avanço de respostas à demanda energética e até mesmo a transição do setor de transportes para soluções elétricas (WICKERT; JÚNIOR ARAÚJO, 2024).

Nessa perspectiva, frisa-se que esses fatores, combinados com políticas públicas e preferências de mercado, moldam as trajetórias da transição energética e determinam sua velocidade e abrangência, ressaltando o impacto estrutural e sistêmico dessas mudanças. Nessa perspectiva, o Gráfico 2 evidencia a evolução da produção global de eletricidade nuclear em TWh, destacando variações regionais ao longo do período de 1970 a 2022 (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

A América do Norte se consolidou como líder mundial na produção nuclear, atingindo seu pico em torno de 900 TWh nos anos 2000 e mantendo níveis elevados até 2022, embora com uma leve redução desde então. Já a Europa Ocidental e Central segue um padrão semelhante, alcançando seu auge nos anos 1990 com 850 TWh, mas diminuindo gradualmente para cerca de 600 TWh em 2022, devido a políticas de descomissionamento e mudanças na matriz energética em países como Alemanha e Suíça (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024):

Gráfico 2 – Geração de eletricidade nuclear por região (1970-2022)



Fonte: World Nuclear Association (2024, p. 4).

A Ásia, por sua vez, apresentou um crescimento exponencial, saindo de aproximadamente 100 TWh em 1980 para mais de 800 TWh em 2022, impulsionada por investimentos robustos na China, Coreia do Sul e Japão, que priorizaram a energia nuclear como estratégia para atender à crescente demanda energética com baixa emissão de carbono. A Europa Oriental e Rússia mantiveram uma trajetória de crescimento mais estável, com a produção atualmente próxima de 400 TWh, enquanto regiões como América do Sul e África permanecem com valores abaixo de 50 TWh, refletindo sua limitada infraestrutura nuclear e menor foco nessa tecnologia (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

O comportamento técnico da energia nuclear, destacado pelo gráfico, reforça seu papel como fonte de base altamente confiável e estável, que opera de forma

contínua e complementa fontes intermitentes, como solar e eólica. Além disso, sua contribuição ambiental é significativa, considerando que os mais de 2.500 TWh produzidos globalmente em 2022 evitaram emissões substanciais de gases de efeito estufa que seriam geradas pela queima de combustíveis fósseis (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

Essa característica torna a energia nuclear uma aliada crucial no combate às mudanças climáticas, mesmo que a questão do descarte de resíduos e a percepção de risco associada a acidentes nucleares sejam desafios persistentes. Do ponto de vista econômico, os dados refletem a influência de políticas regionais na viabilidade da energia nuclear. Na Ásia, por exemplo, subsídios governamentais e investimentos estratégicos possibilitaram uma rápida expansão. Em contraste, a Europa Ocidental enfrenta altos custos de descomissionamento e uma transição para renováveis, o que contribuiu para o declínio observado na produção (MUSA, 2024).

Socialmente, as percepções em torno da segurança nuclear e os efeitos de acidentes históricos, como Chernobyl e Fukushima, influenciam diretamente o apoio público, particularmente na América do Norte e Europa. Por outro lado, em regiões de alta demanda energética, como a Ásia, campanhas governamentais e necessidades econômicas garantem maior aceitação da energia nuclear (MUSA, 2024). O Gráfico 2 revela, portanto, como os aspectos técnicos, ambientais, econômicos e sociais estão intrinsecamente conectados e moldam a utilização da energia nuclear em diferentes regiões.

3.1.2. Aspectos fundamentais da transição energética

A transição energética desejada deve ir além da simples redução e neutralização das emissões de carbono. Ela precisa ser uma ferramenta capaz de promover avanços socioeconômicos e ambientais de maneira integrada. Para alcançar esse objetivo, é essencial que as diversas estratégias de descarbonização sejam organizadas com base em pilares estruturais amplamente reconhecidos em relatórios oficiais e políticas públicas. Abaixo, são apresentados alguns desses pilares fundamentais para uma transição energética eficiente e sustentável.

3.1.2.1. O papel do Brasil na transição energética global

O desenvolvimento de tecnologias voltadas à transição para uma economia com baixas emissões de carbono continua sendo um elemento essencial, mas não representa o principal obstáculo para o Brasil no curto e médio prazos. O país já detém expertise em soluções tecnológicas nesse campo, como a bioenergia, e está bem posicionado para exportá-las. No entanto, estudos e os compromissos assumidos nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) apontam que os desafios mais significativos residem na adoção e disseminação das tecnologias existentes (MUSA, 2024).

Para isso, são indispensáveis políticas climáticas consistentes, regulamentações claras e instrumentos de mercado eficazes que facilitem essa transição. A energia eólica offshore surge como uma oportunidade estratégica para o Brasil, podendo se beneficiar da infraestrutura existente no setor de petróleo e gás. Combinando esse know-how com investimentos em transmissão e distribuição, a eólica offshore pode se tornar uma fonte significativa de eletricidade, tanto para integrar o sistema interligado nacional quanto para produzir hidrogênio verde (FERREIRA; MACHADO, 2021).

Contudo, a maior utilização de fontes intermitentes, como a eólica e a solar, exige o desenvolvimento de tecnologias e sistemas avançados de armazenamento e integração de eletricidade. Essa nova infraestrutura precisará ser altamente flexível, possibilitando a diversificação de fontes e a implementação de ferramentas para ajuste rápido da demanda energética. Assim, é importante destacar que tecnologias limpas e eficientes já estão disponíveis no Brasil. No entanto, o progresso depende de melhorias nos marcos regulatórios, como a tarifação de energia, e na integração de sistemas avançados (MUSA, 2024).

Redes elétricas inteligentes, gestão eficiente da demanda, e a integração com telecomunicações e transportes são áreas que necessitam de atenção prioritária. Adicionalmente, a confiabilidade e resiliência desses sistemas devem ser aprimoradas para enfrentar eventos climáticos extremos, que estão cada vez mais frequentes devido às mudanças climáticas globais. O alinhamento desses fatores permitirá que o Brasil aproveite plenamente seu potencial energético e avance de

maneira sustentável em direção à descarbonização econômica (FERREIRA; MACHADO, 2021).

3.1.2.2. Infraestrutura energética e desafios da modernização

A infraestrutura energética brasileira, amplamente desenvolvida após a Segunda Guerra Mundial e intensificada a partir da década de 1970, já não responde plenamente às necessidades contemporâneas. Grande parte das redes de petróleo, gás, eletricidade e até da malha viária enfrenta limitações significativas, especialmente diante da crescente necessidade de integrar novas tecnologias. A adoção de geração distribuída, o avanço do uso de biometano e biogás, além da futura produção de hidrogênio verde, exigem transformações estruturais robustas para garantir eficiência, sustentabilidade e resiliência às mudanças climáticas, cada vez mais intensas (MUSA, 2024).

A ampliação da participação de fontes renováveis, como solar e eólica — tanto em onshore quanto offshore —, demanda inovações substanciais nos sistemas de transmissão e operação elétrica. Essas redes precisam ser ajustadas para não apenas integrar a geração renovável, mas também acomodar o setor de transporte elétrico e as tecnologias de armazenamento de energia, fundamentais para sustentar a produção de hidrogênio verde. Além disso, a transição energética requer mudanças não apenas nas infraestruturas de geração, transmissão e distribuição, mas também nos sistemas de consumo (IMMICH et al., 2023).

Demanda-se, portanto, a modernização de malhas viárias, edifícios, equipamentos e veículos, bem como o aprimoramento do planejamento urbano para garantir cidades mais sustentáveis e preparadas para eventos climáticos extremos. Ademais, a adoção de tecnologias de baixo carbono, como as associadas à eletromobidade, sublinha a urgência de uma infraestrutura que não apenas incorpore essas inovações, mas funcione de maneira integrada em redes altamente conectadas (IMMICH et al., 2023).

Essas estruturas devem ser resilientes, capazes de suportar extremos climáticos e operar eficientemente em sinergia com ambientes urbanos. Esse cenário exige uma abordagem proativa que priorize investimentos em inovação e

adaptação, garantindo que o Brasil possa aproveitar seu potencial energético com eficiência e alinhado às demandas globais de sustentabilidade.

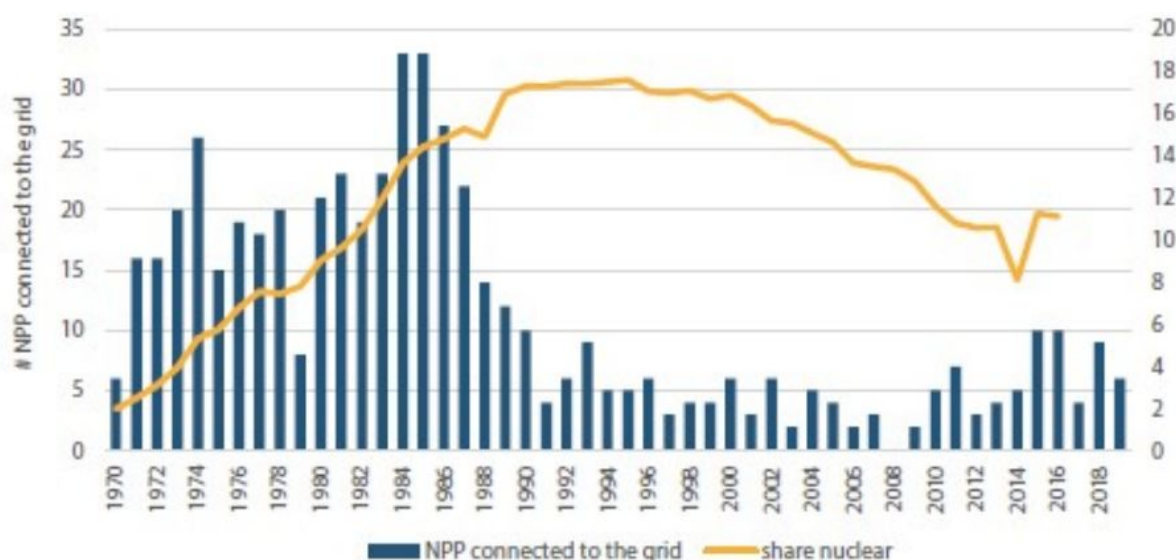
3.2. CENÁRIOS FUTUROS PARA A INCLUSÃO DA ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL A PARTIR DAS ESPECIFICIDADES DO SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL E OPORTUNIDADES E DESAFIOS RELACIONADOS À ENERGIA NUCLEAR NO PROCESSO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Este tópico analisará o panorama atual da energia nuclear, destacando seu papel na matriz energética global e os desafios e oportunidades enfrentados em sua implementação e expansão. Serão exploradas as possibilidades futuras dessa tecnologia, considerando avanços técnicos e sua importância na redução das emissões de carbono e na garantia de segurança energética. Além disso, serão apresentadas soluções inovadoras, como os Reatores Modulares Pequenos (SMRs), que prometem combinar eficiência, flexibilidade e custos reduzidos, contribuindo de forma estratégica para a transição energética em um cenário de crescente demanda por fontes sustentáveis e resilientes.

3.2.1. Evolução da energia nuclear: contribuições e desafios na matriz energética global

A energia nuclear, ao longo das últimas décadas, tem contribuído significativamente para a matriz energética mundial, representando cerca de 10% da oferta global de eletricidade. Este desempenho, que alcançou seu auge em termos de expansão durante as décadas de 1970 e 1980, reflete o período de maior construção de reatores nucleares, conforme apresentado no gráfico abaixo. O número de unidades conectadas à rede durante essas décadas cresceu substancialmente, acompanhado por um aumento na participação nuclear na geração global de energia, como indica o Gráfico 3:

Gráfico 3 – Evolução da construção de reatores nucleares e participação na geração global de eletricidade (1970-2018)



Fonte: Moura (2022, p. 11).

Os dados do gráfico evidenciam que, entre 1970 e 1985, houve um aumento expressivo na construção de reatores nucleares, com picos de 30 novas conexões anuais à rede elétrica, período que consolidou a energia nuclear como um componente crucial na geração elétrica. Esse aumento acompanhou o avanço tecnológico e os esforços globais para diversificar as fontes de energia diante de crises do petróleo. Durante esse período, a energia nuclear alcançou uma participação global de 17% na produção de eletricidade.

Entretanto, a partir dos anos 1990, observa-se uma redução acentuada na construção de novas usinas. Essa queda está fortemente associada à competitividade econômica de fontes fósseis, como o gás natural, que, com custos significativamente reduzidos, tornou-se mais atrativo para a expansão da capacidade instalada de energia. Este cenário impactou diretamente a participação da energia nuclear, que passou a registrar uma trajetória de declínio gradual (FERREIRA; MACHADO, 2021).

Nos anos 2000, o panorama global da energia nuclear sofreu algumas alterações, impulsionado pela China. Com a construção de 37 reatores nucleares de terceira geração, o país conseguiu interromper a tendência de declínio no uso dessa tecnologia. Esse movimento reflete a estratégia chinesa de priorizar fontes de

energia com baixa emissão de carbono para atender à crescente demanda elétrica de sua economia em rápida expansão (FERREIRA; MACHADO, 2021).

Em contrapartida, na Europa e América do Norte, a construção de novos reatores permaneceu estagnada, limitando a contribuição dessas regiões para o aumento da capacidade nuclear global. A estagnação na construção de reatores em economias desenvolvidas pode ser explicada pela idade avançada da infraestrutura existente. Grande parte dos reatores nucleares atualmente em operação foi construída há mais de três décadas (FERREIRA; MACHADO, 2021).

Embora as atualizações e manutenções periódicas tenham permitido sua operação contínua, o envelhecimento natural dessas instalações exige investimentos crescentes em segurança e modernização, o que tem influenciado negativamente a viabilidade econômica de novas construções. Por outro lado, a tecnologia de terceira geração, especialmente na China, tem apresentado avanços significativos em segurança operacional e eficiência energética. Reatores mais modernos oferecem maior confiabilidade e reduzem os custos de operação a longo prazo, aumentando sua competitividade técnica em relação a outras fontes de energia.

Destaca-se também que a energia nuclear permanece como uma das tecnologias mais eficazes para mitigar emissões de carbono, especialmente em comparação com fontes fósseis. O gráfico demonstra que, mesmo com a redução na construção de novas usinas, a energia nuclear ainda desempenha um papel essencial em sistemas energéticos que buscam descarbonizar suas operações. Nos países que ainda dependem fortemente de carvão e gás natural, como os Estados Unidos e algumas nações europeias, a energia nuclear tem sido fundamental para evitar emissões significativas de gases de efeito estufa (IMMICH et al., 2023).

O declínio na construção de novos reatores a partir dos anos 1990 foi amplamente influenciado pelos custos competitivos do gás natural, que, em muitos casos, se mostrou uma opção mais acessível para atender à demanda por eletricidade. Contudo, em países como a China, onde a energia nuclear foi priorizada, os benefícios econômicos a longo prazo, como menor dependência de importações energéticas e redução de emissões, têm sustentado investimentos

contínuos na construção de reatores modernos (IMMICH et al., 2023).

Nos países desenvolvidos, a estagnação no crescimento nuclear também reflete desafios econômicos relacionados aos custos iniciais elevados de construção. A necessidade de atender a padrões rigorosos de segurança e a oposição pública em algumas regiões contribuíram para a preferência por outras fontes renováveis, como solar e eólica, que têm registrado uma rápida redução de custos (JABORANDY; CAVALCANTE; VIEIRA JÚNIOR, 2024).

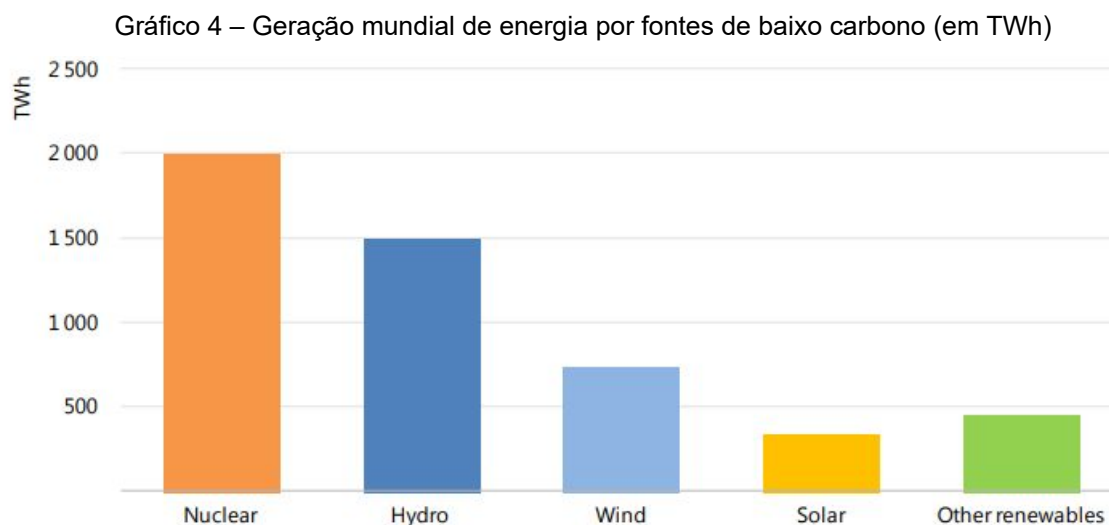
A aceitação pública da energia nuclear varia amplamente entre regiões. Enquanto países como França e China mantêm um histórico de apoio significativo à energia nuclear, outras nações, como Alemanha, optaram por descomissionar seus reatores após eventos como o acidente de Fukushima em 2011. Essa disparidade reflete preocupações relacionadas à segurança e ao gerenciamento de resíduos nucleares, que permanecem como barreiras para sua expansão em diversas partes do mundo (JABORANDY; CAVALCANTE; VIEIRA JÚNIOR, 2024).

Assim, o Gráfico 3 ressalta tanto os períodos de crescimento quanto os desafios enfrentados pela energia nuclear ao longo das décadas. Embora a construção de novos reatores tenha diminuído em várias regiões, a modernização e a expansão lideradas pela China mostram que a energia nuclear ainda tem potencial para desempenhar um papel estratégico na transição energética global. Para garantir sua viabilidade futura, será necessário um equilíbrio entre avanços tecnológicos, políticas públicas eficazes e a mitigação de preocupações sociais.

A energia nuclear desempenha um papel essencial na geração de eletricidade com baixa emissão de carbono, especialmente em economias avançadas. De acordo com dados da IEA (2019), essa fonte energética se destaca como a principal responsável por fornecer 40% de toda a capacidade instalada de fontes não poluentes em países desenvolvidos. Sua relevância no contexto energético global reflete o potencial para mitigar mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, aspectos fundamentais para a transição energética sustentável.

Dessa forma, o Gráfico 4 ilustra a produção global de energia por diferentes fontes limpas, com destaque para a posição da energia nuclear frente às demais

alternativas renováveis:

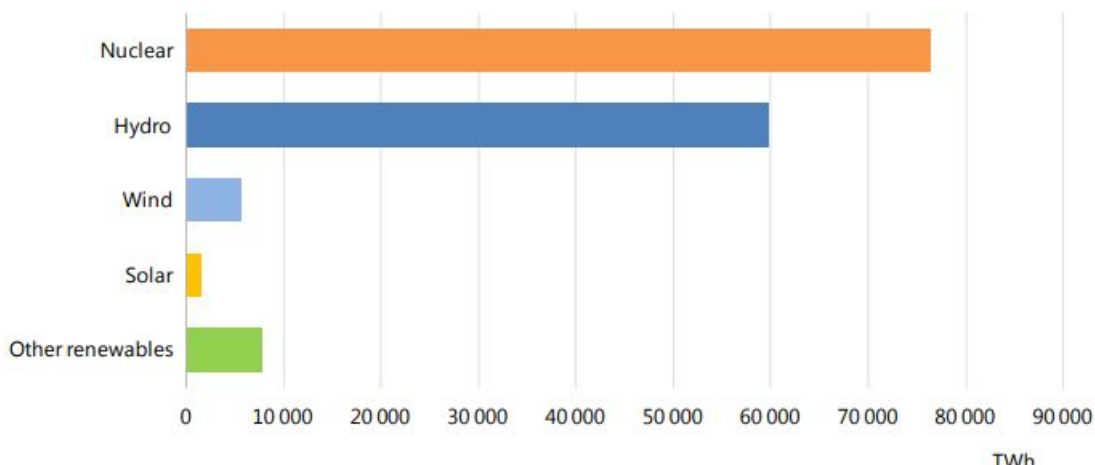


Fonte: IEA (2019, p. 9).

Conforme o Gráfico 4, pode-se entender que a energia nuclear lidera a produção de energia entre as fontes limpas, atingindo cerca de 2.000 TWh, superando hidrelétricas, que alcançam aproximadamente 1.800 TWh. A energia eólica surge em seguida, com geração em torno de 1.000 TWh, enquanto a solar contribui com cerca de 300 TWh, e outras fontes renováveis somam uma parcela menor, em torno de 400 TWh (JABORANDY; CAVALCANTE; VIEIRA JÚNIOR, 2024).

Observa-se também que, ao longo dos últimos 50 anos, a energia nuclear consolidou sua posição como a principal fonte de geração de eletricidade com baixa emissão de carbono em países desenvolvidos. Essa fonte energética acumulou uma produção superior a 70.000 TWh, superando amplamente as demais alternativas de geração limpa. A energia hidrelétrica, a segunda maior contribuinte, gerou cerca de 60.000 TWh no mesmo período, enquanto as fontes solar e eólica, apesar de seu crescimento recente, apresentaram um desempenho historicamente inferior, com volumes acumulados muito menores, conforme mostrado no Gráfico 5:

Gráfico 5 – Geração Acumulada de Energia de Fontes Limpas nos Últimos 50 Anos (em TWh)



Fonte: IEA (2019, p. 9).

O Gráfico 5 demonstra que a energia nuclear lidera com cerca de 75.000 TWh gerados, destacando-se como a principal opção tecnológica entre as fontes não emissoras. A energia hidrelétrica, embora também relevante, aparece em segundo lugar, com aproximadamente 60.000 TWh acumulados. Em contraste, as fontes eólica e solar, somadas, não chegam perto desse patamar, refletindo sua implementação relativamente recente e seu menor nível de maturidade tecnológica em comparação com a energia nuclear e a hidrelétrica. Já as outras fontes renováveis aparecem com contribuições ainda mais modestas, somando valores inferiores a 10.000 TWh (SIQUEIRA 2024).

A supremacia da energia nuclear está associada à sua alta densidade energética e à capacidade de oferecer eletricidade de forma consistente, independentemente das condições climáticas. Essa confiabilidade é um diferencial em relação às fontes solar e eólica, que apresentam variações na geração devido a fatores naturais. No entanto, o elevado custo inicial das usinas nucleares é um desafio econômico significativo, embora seja compensado pelos baixos custos de operação ao longo de sua vida útil, que pode ultrapassar 40 anos (SIQUEIRA 2024).

Do ponto de vista ambiental, a energia nuclear não emite dióxido de carbono durante a geração, o que a torna uma aliada na redução do impacto das mudanças climáticas. Entretanto, a gestão de resíduos nucleares e a necessidade de manter altos padrões de segurança são questões cruciais que requerem soluções de longo prazo. Socialmente, a energia nuclear promove o desenvolvimento de uma força de

trabalho especializada e estimula a inovação tecnológica, mas enfrenta desafios relacionados à percepção pública e à aceitação de novos projetos (FERNANDES et al., 2021).

Nessa perspectiva, a partir dos dados apresentados, pode-se concluir que a energia nuclear representa um papel estratégico na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. Embora as fontes renováveis como solar e eólica estejam em ascensão, a diferença acumulada evidencia a necessidade de complementaridade entre essas tecnologias e a energia nuclear para atender à demanda global de eletricidade com segurança, eficiência e baixo impacto ambiental (FERNANDES et al., 2021).

3.2.2. Pequenos Reatores Modulares (SMRs): Uma Revolução na Energia Nuclear para um Futuro Sustentável

Os reatores nucleares tradicionais operam com custos fixos elevados, os quais só se tornam economicamente viáveis em projetos de grande porte, devido à característica chamada de economia de escala (JANNUZZI, 2024). Esse modelo, embora eficiente em alta capacidade instalada, enfrenta desafios significativos, como o alto investimento inicial e a complexidade de construção. Nesse cenário, os pequenos reatores modulares (SMRs, do inglês Small Modular Reactors) emergem como uma alternativa promissora para o futuro da energia nuclear, propondo inovações que podem transformar o setor.

Os SMRs destacam-se por serem mais simples e seguros, conforme apontam Nian, Mignacca e Locatelli (2022). Eles requerem uma fração do capital investido em comparação aos reatores tradicionais, além de apresentarem maior flexibilidade operacional. De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2023), esses reatores da nova geração possuem capacidade de até 300 MW e são projetados para fabricação modular. Seus componentes são produzidos em fábricas e transportados para o local de instalação, permitindo que a geração de energia seja ajustada conforme as necessidades específicas de cada região.

Tecnologicamente, os SMRs abrangem uma variedade de modelos, incluindo os reatores de água pressurizada (PWRs), amplamente utilizados nas usinas nucleares existentes. O caráter modular desses reatores possibilita que múltiplas

unidades sejam instaladas em um único local, criando plantas nucleares escalonáveis. Essa abordagem reduz o trabalho no local de construção e agiliza a conclusão do projeto, com alguns designs sendo projetados para chegarem ao local de operação já montados e prontos para uso (JANNUZZI, 2024).

Uma vantagem econômica significativa dos SMRs é a possibilidade de dividir os altos custos de investimento inicial em etapas menores, graças à sua modularidade. Isso permite que uma planta nuclear seja expandida gradualmente, à medida que a demanda por energia cresce. Além disso, ao reduzir a escala de cada unidade, os SMRs apresentam maior flexibilidade para atender às demandas energéticas de menor porte, como em comunidades remotas ou países sem experiência em energia nuclear (JANNUZZI, 2024).

Embora alguns críticos argumentem que os SMRs perdem competitividade devido à ausência de economia de escala, estudos como os de Locatelli, Bingham e Mancini (2014) demonstram que os benefícios intrínsecos desses reatores podem compensar tal limitação. Entre essas vantagens estão a simplificação dos projetos, a padronização dos componentes e a manufatura em série. A produção em massa de peças como válvulas e sistemas auxiliares reduz significativamente os custos, além de aumentar a eficiência do processo de construção.

Contudo, custo de operação e manutenção também varia entre os modelos de reatores. Segundo a NEA/OECD, enquanto os grandes reatores nucleares apresentam custos que oscilam entre 16,9 e 25,8 dólares por megawatt-hora (MWh), os SMRs têm valores que variam de 7,1 a 36,2 dólares por MWh, dependendo do projeto e das condições locais. Os SMRs também apresentam custos mais baixos no descomissionamento, graças à sua estrutura modular.

Além da geração de eletricidade, os SMRs possuem aplicações diversificadas, que incluem a dessalinização da água, produção de hidrogênio e fornecimento de calor para processos industriais. Essa flexibilidade torna-os particularmente úteis em sistemas híbridos, onde podem complementar fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. Os SMRs também são vistos como uma solução ideal para substituir pequenas e médias usinas de combustíveis fósseis, especialmente diante de regulamentações ambientais mais rígidas e custos

crescentes associados às emissões de carbono (DIAS et al., 2024).

Além disso, países sem experiência no setor nuclear podem se beneficiar da simplicidade operacional dos SMRs, que exigem menos infraestrutura e oferecem maior segurança (DIAS et al., 2024).

Diante desse cenário, há que se destacar o estudo elaborado por Locatelli, Bingham e Mancini (2014), que identificaram nichos de mercado específicos onde os SMRs podem ser competitivos. Eles são ideais para situações em que a demanda energética varia entre 300 MW e 1 GW, potência insuficiente para justificar a construção de um grande reator. Em locais onde a energia de fontes fósseis está em desuso, os SMRs podem servir como uma alternativa mais limpa e eficiente.

Por fim, embora ainda estejam em fase de desenvolvimento, os SMRs representam uma inovação promissora para o setor nuclear. Sua modularidade, custos mais baixos e flexibilidade operacional fazem deles uma opção atraente para atender às necessidades energéticas em um mundo que busca reduzir as emissões de carbono e diversificar sua matriz energética. Com avanços contínuos em tecnologia e regulamentação, esses reatores podem se tornar um componente essencial da transição para um futuro mais sustentável.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo de caso, optou-se por uma metodologia que permita uma análise abrangente e detalhada da competitividade econômica e ambiental da energia nuclear em comparação às fontes convencionais, tais como usinas de carvão e gás natural. O principal instrumento utilizado é o Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE), um indicador reconhecido que abrange todos os custos ao longo do ciclo de vida das usinas elétricas, proporcionando uma visão holística sobre o investimento inicial, custos operacionais, manutenção, combustível e desempenho operacional ao longo da vida útil.

Inicialmente, foi estabelecido um conjunto de parâmetros para viabilizar uma comparação justa e coerente entre as fontes energéticas estudadas, considerando usinas com potências equivalentes para garantir a equidade das análises:

- **Capacidade instalada (MW):** Representa a potência máxima nominal das usinas analisadas, uniformizada para possibilitar comparações objetivas entre diferentes tecnologias.
- **Custo inicial (CAPEX):** Inclui todos os gastos iniciais necessários à construção e instalação da infraestrutura geradora.
- **Custos anuais de operação e manutenção (O&M):** Envolvem despesas recorrentes essenciais à manutenção operacional contínua das instalações.
- **Custos anuais de combustível:** Aplicáveis principalmente às usinas fósseis (carvão e gás natural) e nucleares.
- **Vida útil operacional das usinas (anos):** Período previsto para operação eficiente e economicamente viável das diferentes tecnologias analisadas.
- **Taxa de desconto (%):** Utilizou-se uma taxa fixa de 8%, refletindo condições de financiamento e risco típicas no contexto brasileiro, um país com taxas de juros historicamente elevadas e custos financeiros mais elevados que influenciam diretamente a viabilidade econômica de projetos intensivos em capital, como é o caso das usinas nucleares e renováveis.

- Os valores relacionados a CAPEX, custos operacionais e de manutenção, combustível foram obtidos a partir do relatório *Projected Costs of Generating Electricity* (PROJECTED, 2020). O cálculo do Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) será realizado através das seguintes expressões:

$$LCOE = \frac{\text{Valor Presente Total dos Custos}}{\text{Valor Presente Total da Energia Produzida}}$$

Equação 1

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{el}}{(1+i)^t}}$$

Equação 2

onde:

I_0 : Investimento inicial (CAPEX);

A_t : Custos anuais de operação e manutenção no ano t ;

M_{el} : Energia anual gerada;

i : Taxa de desconto;

n : Vida útil da usina (anos).

5. ESTUDO DE CASO

O cálculo do Levelized Cost of Electricity (LCOE) para uma usina movida a gás foi realizado com base na média dos custos associados aos principais componentes que impactam a geração de energia. Esses componentes incluem os valores relativos ao combustível, os custos de operação e manutenção (O&M), além do capital necessário para a construção e instalação da usina (Capex). Os dados utilizados foram os da tabela 1:

Tabela 1 - Base de dados para turbina à gás (Fonte: Projected Costs of generating Electricity, 2020)

Planta a gás com 85% de fator de capacidade				
Pais	Combustível (USD/MWh)	Carbono(USD/ MWh)	O&M (USD/MWh)	Capex (USD/kWe)
Australia	56,04	12,75	12,75	955
Australia	64,96	1,48	1,48	2826
Bélgica	45,88	10,18	10,18	767
Bélgica	42,65	9,47	947	1009
Bélgica	47,06	10,45	10,45	974
Canada	19,19	10,65	10,65	1058
Itália	45,5	10,1	10,1	590
Japão	61,05	10,84	10,84	1109
Coreia do Sul	60,82	10,8	10,8	1107
Coreia do Sul	58,23	10,34	10,34	838
México	21,62	12	12	669
México	18,29	10,15	10,15	667
México	18,89	10,48	10,48	466
Romênia	47,06	10,45	10,45	254
Estados unidos	22,91	5,09	5,09	2412
Brasil	18,83	11,21	10,45	958
China	53,54	13,49	10,45	560
Mediana	45,88	10,45	10,45	955

Com base nos valores apresentados, os dados utilizados como inputs para o cálculo do LCOE de uma usina movida a gás foram aqueles fornecidos na Tabela 2:

Tabela 2 - Dados para calculo do LCOE - Planta a gás (Fonte: produzido pelo autor, 2025)	
Suposições	
CAPEX (USD/kWe)	955
CAPEX Total	955.000
O&M (USD/MWh/ano)	10
Inflação O&M (%)	2%
Combustível (USD/MWh/ano)	46
Carbono (USD/MWh/ano)	10
Potencia (MW)	1
Energia gerada por ano (kWh)	8760
Tempo do projeto (anos)	25
Taxa de desconto (%)	8%

No caso de uma usina movida a carvão, foi empregada a mesma metodologia para a obtenção do LCOE. Os dados considerados são apresentados na tabela 3:

Tabela 3 - Base de dados para usina à carvão (Fonte: Projected Costs of generating Electricity, 2020)

Planta a carvão com 85% de fator de capacidade				
Pais	Combustível (USD/MWh)	Carbono (USD/MWh)	O&M (USD/MWh)	Capex (USD/kWe)
Australia	29,65	25,47	8,69	2433
Australia	39,58	3,4	19,34	4490
Australia	5,13	34,36	11,26	3756
Japão	28,73	24,68	19,31	2419
Coreia do Sul	27,47	23,6	11,62	1151
Estados Unidos	20,19	28,22	30,47	4382
Estados Unidos	20,36	28,46	22,25	3447

Estados Unidos	18,23	25,48	17,01	2478
Estados Unidos	23,5	13,14	30,45	4604
Estados Unidos	17,51	24,47	17,2	2582
Estados Unidos	22,38	12,51	30,45	4654
Estados Unidos	17,16	23,99	29,5	4157
Estados Unidos	23,32	13,04	42,96	5991
Brasil	31,76	32,03	8,6	2189
China	28,02	22,7	14,97	800
India	26,43	22,7	5,83	1148
India	26,43	22,7	38,65	1111
Mediana	23,5	23,99	19,31	2582

Com base nos valores apresentados, os dados utilizados como inputs para o cálculo do LCOE de uma usina movida a carvão foram aqueles fornecidos na Tabela 4:

Tabela 4 - Dados para cálculo do LCOE - Planta a carvão (Fonte: produzido pelo autor, 2025)	
Suposições	
CAPEX (USD/kWe)	2.582
CAPEX Total	2.582.000
O&M (USD/MWh/ano)	19,31
Inflação O&M (%)	2%
Combustível (USD/MWh/ano)	24
Carbono (USD/MWh/ano)	24
Potencia (MW)	1
Energia gerada por ano (kWh)	8.760
Tempo do projeto (anos)	25

Taxa de desconto (%)	8%
----------------------	----

No caso de uma usina nuclear, foi empregada a mesma metodologia para a obtenção do LCOE. Os dados considerados são apresentados na tabela 5:

Tabela 5 - Base de dados para planta nuclear (Fonte: Projected Costs of generating Electricity, 2020)

Planta nuclear - Nova construção			
Pais	Combustível (USD/MWh)	O&M (USD/MWh)	Capex (USD/kWe)
França	9,33	14,26	4013
Japão	13,92	25,84	3963
Coreia do Sul	9,33	18,44	2157
Rússia	4,99	10,15	2271
Estados Unidos	9,33	10,6	4250
China	10	26,42	2500
Índia	9,33	23,84	2778
Mediana	9,33	18,44	2778

Com base nos valores apresentados, os dados utilizados como inputs para o cálculo do LCOE de uma usina nuclear foram aqueles fornecidos na Tabela 6:

Tabela 6 - Dados para cálculo do LCOE - Planta nuclear (Fonte: produzido pelo autor, 2025)	
Suposições	
CAPEX (USD/kWe)	2.778
CAPEX Total (USD)	2.778.000
O&M (USD/MWh/ano)	18
Inflação O&M (%)	2%
Combustível (USD/MWh/ano)	9
Carbono (USD/MWh/ano)	-
Potência (MW)	1
Energia gerada por ano (kWh)	8.760
Tempo do projeto (anos)	25
Taxa de desconto (%)	8%

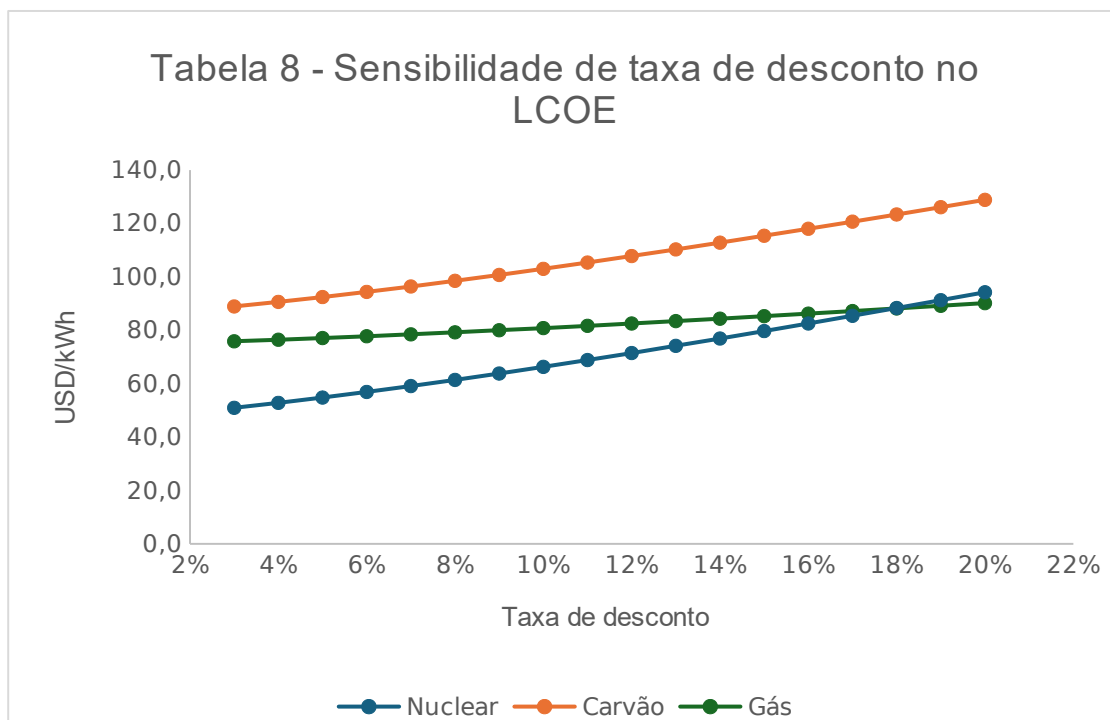
Os resultados estão apresentados na tabela 7. O custo em U\$/KWh para usinas a gás e carvão é significativamente maior do que o custo das usinas nucleares. Os dados estão dentro das expectativas e mostram a já conhecida vantagem econômica da geração nuclear em comparação à geração fóssil.

Tabela 7 - Comparação de LCOE

LCOE	USD/kWh
Gás Natural	79,2
Carvão	98,5
Nuclear	61,4

Nas usinas nucleares, que são notoriamente intensivas em capital (CAPEX), o impacto da taxa de desconto sobre o LCOE é particularmente acentuado. Como grande parte dos custos totais está concentrada no investimento inicial — com menores custos operacionais e de combustível ao longo do tempo — variações na taxa de desconto alteram significativamente o valor presente desses desembolsos iniciais. Assim, taxas de desconto mais elevadas penalizam desproporcionalmente a competitividade econômica da energia nuclear frente a tecnologias com menor CAPEX e maior parcela de custos variáveis.

Para evidenciar esse impacto, foi criado o gráfico do LCOE pela variação da taxa de desconto. A partir de taxas de desconto de 18% às plantas à gás se tornam mais competitivas de devido seu baixo CAPEX.



6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz dos objetivos delineados, este trabalho analisou criticamente a viabilidade da energia nuclear como vetor estratégico na transição energética brasileira, em especial frente às fontes fósseis. A questão central da pesquisa consistiu em compreender quais são os custos econômicos da energia nuclear em comparação ao gás natural e ao carvão, considerando sua efetiva contribuição para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e sua inserção na matriz elétrica nacional. Para tanto, o estudo combinou uma revisão bibliográfica rigorosa com a aplicação prática do Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE), calculado com base em dados reais.

Os resultados do estudo de caso demonstraram que o LCOE da energia nuclear, estimado em R\$ 61,4/MWh, mostrou-se inferior ao do carvão (R\$ 98,5/kWh) e do gás natural (R\$ 79,200/kWh), evidenciando sua competitividade econômica. A análise de sensibilidade revelou, ainda, que a taxa de desconto exerce influência significativa: com taxas acima de 18%, as fontes com menor CAPEX — como o gás natural — tornam-se relativamente mais atrativas. Contudo, mesmo diante dessas variações, a energia nuclear mantém vantagem na variável ambiental, destacando-

se por sua reduzida emissão de CO₂ em comparação às demais. Esses dados corroboram a relevância dos reatores nucleares, sobretudo os Pequenos Reatores Modulares (SMRs), como alternativas tecnológicas viáveis, seguras e escaláveis para o contexto energético brasileiro.

A contribuição deste trabalho reside, portanto, na produção de uma análise empírica fundamentada que reforça a viabilidade técnica e econômica da energia nuclear no Brasil, promovendo um debate atualizado sobre seu papel na segurança energética e na descarbonização da matriz elétrica. Ao fornecer parâmetros concretos de custo e performance, o estudo contribui para orientar políticas públicas, projetos de engenharia e estratégias regulatórias alinhadas à sustentabilidade e à resiliência do setor.

Todavia, reconhecem-se limitações importantes. A modelagem do LCOE não contemplou custos socioambientais indiretos, como a gestão de resíduos nucleares e o ciclo completo do combustível, além de não incluir variáveis institucionais como tempo de licenciamento, percepção pública e riscos políticos. Tais fatores, embora não quantificados neste estudo, são cruciais para a plena compreensão da viabilidade nuclear em contextos periféricos como o brasileiro.

Dessa forma, recomenda-se que pesquisas futuras avancem na integração entre modelagens econômico-ambientais e estudos qualitativos sobre governança nuclear, riscos regulatórios e inovação tecnológica. Adicionalmente, sugere-se aprofundar a análise sobre o papel dos SMRs em cenários descentralizados e híbridos, especialmente em regiões com déficit de infraestrutura energética.

Em suma, este trabalho demonstrou que a energia nuclear, sob determinadas condições técnicas e financeiras, constitui uma alternativa realista e estratégica para um modelo energético mais limpo, seguro e sustentável. Seu uso racional e planejado pode desempenhar papel complementar às fontes renováveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e ampliando a resiliência do sistema elétrico nacional frente aos desafios climáticos e geopolíticos do século XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, Amanda Rodrigues de. **O regime climático internacional, governança e o potencial da tecnologia nuclear**: uma análise das políticas climáticas nacionais e internacionais. 2024. 67f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

DEBASTIANI, Luiz Henrique; SENGGER, Rafael Willian. Entre o desenvolvimento e a proteção ambiental. **Princípios**, v. 43, n. 169, p. 47-66, 2024.

DIAS, Marcus Vinicius Souza et al. Panorama da energia eólica no Brasil com ênfase na região Nordeste. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo - RBAV**, v. 43, n. 1, p. 1-8, 2024..

FERNANDES, Daniella Rodrigues et al. Energia Nuclear: Importância, conceitos químicos e estrutura das usinas nucleares. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 3, p. 635-649, 2021.

FERREIRA, Thiago Vasconcellos Barral; MACHADO, Giovani Vitória. O papel do planejamento na transição energética: mais luz e menos calor. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 2, 2021.

FORTES, Hailton José. **Matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050**: desafios e oportunidades para a neointustrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis. 2024. 80f. Dissertação (Mestrado em Economia do Setor Público) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

IAEA. Nuclear energy and climate change: questions and answers on progress, challenges and opportunities. **IAEA**, 2023. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PAT-002_web.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

IEA. Nuclear power in a clean energy system. **IEA**, 2019. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad5a93ce-3a7f-461d-a441-8a05b7601887/Nuclear_Power_in_a_Clean_Energy_System.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

IMMICH, Vinicius et al. Energia nuclear: uma opinião da sua relação com a sustentabilidade. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 9, n. 2, p. 143-153, 2023.

JABORANDY, Clara Cardoso Machado.; CAVALCANTE, Húrsula.; VIEIRA JÚNIOR, Dênio Fernando Rezende. Análise da experiência europeia como parâmetro à implementação de usinas eólicas offshore no Brasil. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 14, n. 2, p. 1-25, 2024.

JANNUZZI, Gilberto de Martino. Transição energética no Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 76, n. 3, p. 01-13, 2024.

KORZENIEWICZ, Mariza Bethanya Dalla Vecchia. **Análise da matriz energética brasileira e a participação das energias renováveis a partir das políticas ambientais energéticas**. 2021. 55f. Dissertação (Mestrado em Economia do Desenvolvimento) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

LOCATELLI, Giorgio; BINGHAM, Chris; MANCINI, Mauro. Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects. **Progress in Nuclear Energy**, v. 73, p. 75-85, 2014.

LOSEKANN, Luciano; TAVARES, Felipe Botelho. Política Energética no BRICS: desafios da transição energética. **Texto para Discussão**, p. 1-61, 2019.

MOURA, Felipe Roberto Barros de. **O papel da energia nuclear na transição, na segurança e autossuficiência energética dos países**. 2002. 32 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MUSA, Estevão. Revisitando o boom das commodities minerais à luz da transição energética contemporânea. Uma análise do caso brasileiro. **Tramas y Redes**, n. 6, p. 313-337, 2024.

NIAN, Victor; MIGNACCA, Benito; LOCATELLI, Giorgio. Policies toward net-zero: Benchmarking the economic competitiveness of nuclear against wind and solar energy. **Applied Energy**, v. 320, p. 119275, 2022.

PIMENTEL, Paula Emília Oliveira. **Cenários para a transição energética no Brasil 2040**. 2023. 202f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

SIQUEIRA, Kleber Saldanha de. Os paradigmas da energia nuclear no Brasil. **Revista Brasileira de Estudos Estratégicos**, v. 16, n. 31, 2024.

WICKERT, Fabíola de Souza.; JÚNIOR, ARAÚJO, Antônio Carlos Ribeiro. Sustentabilidade na geração de energia elétrica no estado de Roraima-Brasil. **Acta Geográfica**, v. 18, n. 50, p. 99-120, 2024.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. World nuclear performance report 2024. **World Nuclear Association**, 20 ago. 2024. Disponível em: <https://world-nuclear.org/images/articles/World-Nuclear-Performance-Report-2024.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2025.