

Sustentabilidade no Planejamento Energético Nacional: A Infraestrutura de Transporte de Energia no PNE 2050

1. INTRODUÇÃO

O uso da energia é essencial para a realização de atividades cotidianas e se relaciona ao desenvolvimento das sociedades. Desde o domínio do fogo até as diversas tecnologias de geração de energia disponíveis atualmente, a humanidade tem demandado o uso intensivo de recursos naturais. Historicamente, as transições energéticas ocorreram pela substituição de fontes predominantes em função de disponibilidade, custos e eficiência. Destacam-se a passagem da lenha para o carvão mineral e, depois, do carvão para o petróleo. Atualmente, o debate centra-se na expansão das fontes renováveis e na eletrificação dos usos finais (Yang *et al.*, 2024).

A geração e transporte de energia traz impactos ambientais negativos, como a degradação de recursos naturais, alterações na paisagem e conflitos sociais relacionados à construção de infraestrutura energética. Já a emissão de gases de efeito estufa (GEE), decorrente do uso de combustíveis fósseis, é um dos principais problemas atuais e contribui diretamente para as mudanças climáticas. Esses desafios evidenciam a necessidade de promover o equilíbrio entre avanço tecnológico, desenvolvimento socioeconômico e sustentabilidade ambiental.

Nesse ponto, destaca-se que a sustentabilidade, conceito complexo por sua trajetória histórica e múltiplas interpretações, é abordada pelo *Triple Bottom Line* em duas perspectivas: como sistemas interativos ou como dimensões distintas, sendo o pilar econômico o mais controverso (Purvis *et al.*, 2019). Sua evolução vai do ecodesenvolvimento da Conferência de Estocolmo, que buscava integrar equidade social, prudência ecológica e economia voltada às necessidades humanas (Bursztyn; Bursztyn, 2012), ao desenvolvimento sustentável, formulado em crítica ao modelo econômico tradicional.

No Brasil, a infraestrutura de transporte de energia é estratégica, conectando regiões e otimizando o uso dos recursos naturais. Esse componente inclui o sistema de transmissão de energia elétrica e a rede de gasodutos, essenciais em um país de dimensões continentais. Em 2019, o sistema de transmissão de energia somava cerca de 140.000 km, enquanto a malha de gasodutos alcançava 9.400 km, incluindo redes regionais e trechos como GASBOL, Lateral-Cuiabá e Urucu-Coari-Manaus (Brasil, 2020). Decisões nesse setor impactam a eficiência do acesso à energia e reforça a importância de políticas públicas bem estruturadas.

Nesse cenário, o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 destaca-se como um instrumento fundamental para subsidiar decisões governamentais voltadas à expansão do setor energético. Um exemplo de sua relevância foi o relatório de 2007, que orientou investimentos em hidrelétricas, consolidando seu papel como principal fonte de energia renovável nacional (Brasil, 2020).

As crescentes discussões sobre sustentabilidade nos sistemas de energia ressaltam a importância de abordar os impactos ambientais associados à expansão e construção de novas infraestruturas de transmissão. Quase sempre os recursos naturais, passíveis de serem convertidos em eletricidade, se encontram distantes dos centros de consumo. Daí a relevância da transmissão da eletricidade. Um exemplo, são os aproveitamentos de energia eólica no nordeste brasileiro que geram eletricidade consumida fora da região.

Diante desse contexto, surge a questão central deste estudo: como a sustentabilidade é incorporada nas estratégias de infraestrutura de transporte de energia no PNE 2050? Para respondê-la, o presente trabalho analisa o PNE 2050 sob a ótica dos três pilares da sustentabilidade (*Triple Bottom Line*). Buscando identificar a relação entre as recomendações do plano na seção “Infraestrutura de Transporte de Energia” e os aspectos ambiental, social e econômico, categorizando as iniciativas e oferecendo um panorama das estratégias propostas.

Nesse artigo, a fundamentação teórica reúne trabalhos selecionados que discutem estratégias para aprimorar a sustentabilidade nos sistemas de transporte de energia, com ênfase em temas emergentes como mudanças climáticas e a ampliação da participação das fontes renováveis na matriz energética. A seção de análise dos resultados e discussões apresenta o PNE 2050 sob a ótica da sustentabilidade, enquanto as considerações finais sintetizam as principais reflexões do trabalho. Assim, busca-se oferecer uma visão das estratégias de sustentabilidade aplicadas à infraestrutura de transporte de energia no Brasil, contribuindo para o debate sobre políticas públicas no setor.

2. METODOLOGIA

A pesquisa adota uma abordagem qualitativa e exploratória, centrada na análise de dados secundários. Para isso, foram realizadas revisão da literatura e análise documental. A busca na base *Scopus* utilizou as palavras-chave *energy*, *transportation*, *system* e *sustainability*, combinadas pelo operador booleano AND. A seleção dos artigos foi realizada com base na relevância e aderência ao tema.

A análise documental considerou o PNE 2050, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) sob as diretrizes do Ministério de Minas e Energia (MME), na seção “Infraestrutura de Transporte e Energia”. Foram identificadas 15 estratégias recomendadas, que neste estudo foram classificadas segundo os pilares do *Triple Bottom Line*: econômico, ambiental e social.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Zhong e Li (2024) analisam como as mudanças climáticas elevam a demanda por técnicas avançadas de previsão, como o *machine learning*, que utiliza algoritmos capazes de aprender e se aprimorar sem programação explícita. Essas mudanças aumentam a necessidade de soluções de armazenamento de energia, fundamentais para aproveitar excedentes em períodos de alta geração e suprir momentos de baixa. A variabilidade climática intensifica as flutuações na oferta de energia, tornando relevante o monitoramento para equilibrar a oferta e demanda. Além disso, eventos extremos, como tempestades e ondas de calor, impõem riscos à infraestrutura energética, explicitando a urgência de sistemas resilientes e bem planejados.

A imprevisibilidade climática também afeta a integração de fontes renováveis à rede elétrica, exigindo previsões precisas para a estabilidade e evitar sobrecargas. Essa necessidade é particularmente relevante para sistemas de energia solar fotovoltaica, nos quais previsões eficientes contribuem para a gestão e manutenção da estabilidade da rede. Dessa forma, a abordagem proposta aplicada à sistemas energéticos favorece a mitigação climática, pois pode tornar tais sistemas mais resilientes (Zhong; Li, 2024).

A modernização de plantas produtivas pode reduzir emissões e impactos ambientais. Aplicações da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) apontam que, no setor elétrico, os maiores impactos estão ligados à construção e manutenção da infraestrutura. Orfanos *et al.* (2019) destacaram que a produção de alumínio para linhas de transmissão concentra efeitos sobre a camada de ozônio, toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre. Correa *et al.* (2019) observaram que as subestações geram maior carga ambiental na maioria das categorias, exceto na ocupação do solo, em que as linhas de transmissão se destacam pela extensão territorial e pelos resíduos de operação e manutenção.

A incorporação de fontes renováveis é central para diminuição de emissões de GEE. Embora contribuam para mitigar os impactos do consumo de eletricidade, essas fontes enfrentam a intermitência, uma vez que há limitações quanto a sua estocagem em larga escala (Niembro-García *et al.*, 2022). Outro desafio são as perdas em transmissão e distribuição: mais

de 45% dos impactos levantados em categorias como aquecimento global, acidificação e eutrofização decorrem delas (Orfanos *et al.*, 2019). Esse problema, intensificado pela demanda crescente e por restrições ambientais, é mais crítico na distribuição (Moufid *et al.*, 2025). As perdas, que podem decorrer tanto de limitações físicas quanto de falhas operacionais, totalizaram 112.492 GWh no Brasil em 2024 (Brasil, 2025), reforçando a necessidade de estratégias de mitigação para elevar a eficiência do setor.

A integração da resiliência ao planejamento das redes inclui estratégias preventivas, corretivas e restaurativas que, podem reduzir riscos, mas envolvem custos elevados e impactos socioambientais. O modelo de Byles *et al.* (2024), aplicado a incêndios florestais no Colorado, combina resiliência, sustentabilidade e equidade, utilizando ACV e um índice de vulnerabilidade social para priorizar grupos expostos. Busca-se reduzir energia não suprida, custos e impactos ambientais, superando modelos centrados apenas em custos e perdas técnicas.

O Planejamento Integrado de Recursos para sistemas de transmissão de energia, proposto por Gautam *et al.* (2024), constitui uma metodologia voltada ao aumento da resiliência do sistema elétrico frente a eventos extremos. O modelo adota um processo analítico que avalia a condição inicial da rede, identifica configurações vulneráveis a ocorrências de baixa probabilidade e alto impacto, e reavalia a resiliência após a inclusão de novos elementos. O objetivo é orientar a alocação de recursos, apoiar o planejamento do setor e incorporar critérios de eficiência e sustentabilidade no desenvolvimento das redes de transmissão.

O método proposto por Hou *et al.* (2022) para aprimorar a flexibilidade e eficiência de sistemas de transmissão engloba o uso de duas tecnologias: a Comutação Ótima de Transmissão e a Classificação Térmica Dinâmica. A primeira visa otimizar a capacidade de transmissão alterando a topologia da rede, enquanto a segunda aumenta a capacidade e a confiabilidade do sistema ao monitorar a capacidade térmica em tempo real. Ao integrá-las, busca-se mitigar o congestionamento e a utilização da rede, sem realizar mudanças significativas na infraestrutura.

Ranjbar *et al.* (2022) propõem um planejamento bi nível para integrar Recursos Energéticos Distribuídos (RED), como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, às redes existentes, a fim de minimizar o custo social total esperado. Os REDs descentralizam a geração de energia, aproximando-a do consumidor e, quando baseados em fontes renováveis, contribuem para mitigar emissões de GEE. O modelo define capacidade, tecnologia e localização ideais, reduzindo congestionamentos e a necessidade de novas linhas de transmissão, aumentando a confiabilidade com menores investimentos, especialmente em cenários de baixo crescimento de carga. Os resultados indicam redução de custos sociais e de congestionamento, mas impacto limitado na mitigação de GEE, dada a baixa participação desses recursos, o que reforça a necessidade de políticas complementares.

Nguyen *et al.* (2024) analisam redes descentralizadas de energia e água, capazes de aumentar a eficiência operacional por meio de estratégias responsivas, mecanismos financeiros adaptados e medidas de mitigação ambiental. Os resultados apontam que a energia representa 63,49% dos custos totais de produção, indicando potencial para reduzir a dependência de recursos externos, a necessidade de armazenamento e as emissões de CO₂, além de favorecer o uso regional desses recursos e aliviar sistemas de transmissão com sua gestão integrada.

Entretanto, a descentralização energética enfrenta limitações, pois sua viabilidade depende do equilíbrio local entre oferta e demanda. Quando esse limite é ultrapassado, torna-se necessária a configuração tradicional das redes de transmissão, caracterizadas como monopólios naturais, com altos investimentos iniciais e inviabilidade de múltiplas infraestruturas na mesma região (Decker, 2021). Assim, a descentralização amplia a geração e o consumo regionais, mas o transporte de energia permanece centralizado, refletindo os desafios de adaptação de modelos energéticos em uma infraestrutura consolidada e rígida.

Nesse contexto, a diversificação da matriz elétrica é essencial. O crescimento das renováveis é impulsionado pela queda de custos e pelo aumento dos custos de transmissão. A

energia solar fotovoltaica mantém forte expansão, enquanto outras renováveis ainda requerem maior desenvolvimento. Weinand *et al.* (2021) ressaltam que, além de custos e equidade, a aceitação pública é determinante, como no caso da aprovação das turbinas eólicas *onshore* na Alemanha influenciada pelos impactos paisagísticos.

Investimentos em armazenamento e em planejamento emergencial e de longo prazo também são cruciais. Wabukala *et al.* (2024), relacionam a instabilidade no fornecimento a redes ultrapassadas de transmissão e distribuição, responsáveis por interrupções frequentes, em Uganda. Reforçando a necessidade de modernização para o aumento da confiabilidade. As políticas energéticas devem priorizar o fortalecimento das redes, a fim de ampliar sua capacidade, reduzir congestionamentos e prevenir falhas. Além de expandir a geração, é necessário destinar recursos adequados à infraestrutura para atender à demanda crescente sem desconsiderar a sustentabilidade. O planejamento e gestão adequados da energia renovável permitem conciliar metas climáticas com a preservação da biodiversidade (Yang *et al.*, 2024).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O PNE 2050 apresenta estudos elaborados, com o objetivo de construir uma estratégia de longo prazo para o setor energético, consolidados e detalhados em 21 notas técnicas. As estratégias propostas no plano são apresentadas como recomendações que seguem dez princípios norteadores. Entre eles, destaca-se o nono princípio, intitulado "sustentabilidade", que é particularmente relevante para esta pesquisa. Esse princípio enfatiza a necessidade de o setor energético alinhar-se à promoção do desenvolvimento sustentável, fundamentado em políticas públicas que valorizem os atributos ambientais nacionais (Brasil, 2020).

Os principais desafios da transmissão elétrica incluem envelhecimento da infraestrutura, entraves socioambientais e fundiários, e a complexidade operacional decorrente da inserção de fontes intermitentes, como solar e eólica, cuja geração depende de condições naturais (Brasil, 2020). A compensação dessa intermitência é feita principalmente por hidrelétricas, reforçando a importância do sistema de transmissão para o intercâmbio regional de energia.

De forma semelhante, a malha de gasodutos enfrenta desafios estruturais e regulatórios que afetam competitividade e eficiência, como barreiras à entrada de novos agentes, necessidade de regras claras de acesso, complexidade nas interações em um mercado com múltiplos participantes, adaptação dos processos de outorga à novos modelos, integração energética regional e elevada assimetria de informação entre os agentes (Brasil, 2020).

Ao todo foram levantadas 15 recomendações, sendo que 10 delas correspondem à transmissão de eletricidade, e 5 correspondentes à malha de gasodutos (Brasil, 2020). A tabela 1 sintetiza e categoriza as recomendações, referentes à ambas as estruturas, de acordo com o seu enquadramento em cada pilar.

Tabela 1 - Estratégias do PNE e dimensões da sustentabilidade

Econômico	Social	Ambiental
Introduzir mecanismos que favoreçam a adequada gestão de ativos pelas empresas transmissoras	Reduzir assimetria de informação e coordenar expectativas de longo prazo dos agentes	Incentivar o acesso compartilhado das fontes ao sistema de transmissão
Considerar a possibilidade de revitalização ou substituição de equipamentos como alternativa de expansão		
Aumentar a capacidade de transporte do sistema existente		
Desenvolver um ambiente mais favorável para a prestação dos serviços de transmissão		

Realizar estudos prospectivos de expansão da rede de transmissão contemplando soluções que privilegiam maior capacidade de transporte por corredor

Desenvolver instrumentos que facilitem as condições de implantação das novas instalações de transmissão

Aprimorar o processo de planejamento integrado dos sistemas de geração e de transmissão

Introduzir mecanismos de sinalização locacional mais eficientes e eficazes

Promover ações para integrar o sistema de transmissão com as redes de distribuição

Implementar o processo de abertura de mercado com indução à competição

Promover o acesso de terceiros garantido o direito de preferência do proprietário

Aperfeiçoar os mecanismos e ajustes no arcabouço regulatório para permitir interação eficiente entre compradores e vendedores

Articular com outros ministérios atuação com vistas à integração energética com países da América do Sul

Fonte: autores, 2025.

Das 15 estratégias identificadas, 13 concentram-se no âmbito econômico, visando principalmente aumentar a eficiência e maximizar o lucro, embora algumas possam gerar efeitos secundários em outros pilares. Destaca-se a estratégia de “Aprimorar o processo de planejamento integrado dos sistemas de geração e transmissão”, que reduz perdas e traz benefícios ambientais ao aumentar a eficiência e diminuir a demanda.

No âmbito social, a estratégia prioriza a disseminação de informações aos stakeholders, promovendo transparência e maior aceitação social, aumentando a probabilidade de sucesso das medidas implementadas.

A única estratégia atribuída ao pilar ambiental incentiva a descentralização da geração de energia, favorecendo fontes complementares como eólica e solar, minimizando a necessidade de novas infraestruturas e reduzindo impactos socioambientais, como alterações na paisagem, pressão sobre recursos naturais e conflitos sociais. Um contraponto é que a descentralização pode aumentar a demanda de energia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise apresentada destaca que a expansão das infraestruturas de transporte e geração de energia, além de atender à crescente demanda, possui impactos ambientais e sociais relevantes, exigindo a integração dos pilares da sustentabilidade nas estratégias do setor. A descentralização da geração, especialmente por meio de REDs baseados em fontes renováveis, reduz a dependência de extensas redes de transmissão, minimiza impactos socioambientais e melhora a eficiência do sistema. A diversificação da matriz energética, com foco em renováveis, contribui para mitigar mudanças climáticas e descongestionar redes de transmissão. Diante de eventos climáticos extremos, investimentos em tecnologias de previsão e na modernização de sistemas obsoletos são essenciais para aumentar a resiliência e reduzir perdas energéticas, embora envolvam custos elevados, maior uso de recursos e potenciais conflitos socioambientais, incluindo deslocamento de populações.

A análise do PNE 2050 indica que, apesar de a sustentabilidade ser um princípio norteador, as estratégias econômicas predominam sobre as sociais e ambientais, evidenciando

a necessidade de priorizar abordagens equilibradas que integrem os três pilares no planejamento energético nacional, pois o documento é estratégico para subsidiar decisões governamentais sobre políticas públicas.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2025: relatório final**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2025.
- BURSZTYN, M. A.; BURSZTYN, M. **Fundamentos de política e gestão ambiental: caminhos para a sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Garamond, 2012. 612 p. ISBN: 978-85-7617-290-1
- BYLES, D.; KURETICH, P.; MOHAGHEGHI, S. Generation and transmission expansion planning: nexus of resilience, sustainability, and equity. **Processes**, v. 12, p. 590, 2024.
- CORREA, A. U.; LONDOÑO, N. C.; TAMAYO, J. D. A. Life cycle assessment of the power transmission network operated by INTERCOLOMBIA. In: **FISE-IEEE/CIGRE Conference – Living the Energy Transition**, 2019, Medellín. Proceedings [...]. [S.l.: s.n.], 2019.
- DECKER, C. Energy transportation: electricity. In: JOSKOW, P. L.; WOLAK, F. A. (Ed.). **Handbook of energy economics and policy: fundamentals and applications for engineers and energy planners**. Cambridge: Academic Press, 2021. p. 193–238.
- GAUTAM, M.; MCJUNKIN, T.; HRUSKA, R. A resilient integrated resource planning framework for transmission systems: analysis and optimization. **Sustainability**, v. 16, p. 2449, 2024.
- HOU, W.; LI, R. Y. M.; SITTIHAI, T. Management optimization of electricity system with sustainability enhancement. **Sustainability**, v. 14, p. 6650, 2022.
- MOUFID, I. *et al.* Optimizing distribution system performance: a comprehensive review of power loss minimization techniques. **International Journal of Power Electronics and Drive System**, v. 16, n. 2, p. 710–718, 2025.
- NGUYEN, H.; BA-ALAWI, A. H.; YOO, C. Flexible supply-demand side management towards a sustainable decentralized distribution network: a net-negative water-energy-emissions nexus assessment. **Applied Energy**, v. 375, p. 124108, 2024.
- NIEMBRO-GARCÍA, J.; ALFARO-MARTÍNEZ, P.; MARMOLEJO-SAUCEDO, J. A. Life cycle cost and life cycle assessment: an approximation to understand the real impacts of the electricity supply industry. In: VASANT, P.; THOMAS, J.; MUNAPO, E.; WEBER, G.-W. (Org.). **Advances of artificial intelligence in a green energy environment**. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 83–110.
- ORFANOS, N. *et al.* Life-cycle environmental performance assessment of electricity generation and transmission systems in Greece. **Renewable Energy**, v. 139, p. 1447–1462, 2019.
- PURVIS, B.; MAO, Y.; ROBINSON, D. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. **Sustainability Science**, v. 14, p. 681–695, 2019.
- RANJBAR, H.; SABER, H.; SHARIFZADEH, M. Bi-level planning of distributed energy resources into existing transmission grids: pathway to sustainable energy systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 16, p. 4963–4979, 2022.
- WABUKALA, B. M. *et al.* Electricity security in Uganda: measurement and policy priorities. **Utilities Policy**, v. 91, p. 101844, 2024.
- WEINAND, J. M. *et al.* The impact of public acceptance on cost efficiency and environmental sustainability in decentralized energy systems. **Patterns**, v. 2, p. 100301, 9 jul. 2021.
- YANG, Y. *et al.* J. Energy transition: connotations, mechanisms and effects. **Energy Strategy Reviews**, v. 52, p. 101320, 2024.
- ZHONG, Y.; LI, Y. Statistical evaluation of sustainable urban planning: integrating renewable energy sources, energy-efficient buildings, and climate resilience measures. **Sustainable Cities and Society**, v. 101, p. 105160, 2024.