



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

KATIELY MAMEDIO DA SILVA

**O FUTURO DA SEGURANÇA ENERGÉTICA: INTERMITÊNCIA, GEOPOLÍTICA E
O PAPEL ESTRATÉGICO DO GÁS NATURAL**

Sorocaba

2025

KATIELY MAMEDIO DA SILVA

**O FUTURO DA SEGURANÇA ENERGÉTICA: INTERMITÊNCIA, GEOPOLÍTICA E
O PAPEL ESTRATÉGICO DO GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e
Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do
título de Bacharela em Engenharia
Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Antonio Cesar
Germano Martins

Sorocaba

2025

S586f Silva, Katiely Mamedio da
O futuro da segurança energética: intermitência, geopolítica e o papel estratégico do gás natural / Katiely Mamedio da Silva. -- Sorocaba, 2025
51 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Antonio Cesar Germano Martins

1. Gás natural. 2. Recursos energéticos. 3. Segurança energética. 4. Gás como combustível. 5. Mudanças climáticas. I. Título.

KATIELY MAMEDIO DA SILVA

**O FUTURO DA SEGURANÇA ENERGÉTICA: INTERMITÊNCIA, GEOPOLÍTICA E
O PAPEL ESTRATÉGICO DO GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 04/11/2025

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 04 de novembro de 2025.

RESUMO

Devido ao elevado consumo de energia e a preocupação ambiental, tem-se aumentado o uso das fontes solar e eólica, porém essas são intermitentes. O gás natural, por sua vez, tem ganhado destaque na segurança energética global, sendo reconhecido como uma fonte de transição para uma matriz mais sustentável. Além de garantir maior estabilidade na geração elétrica, o gás natural apresenta vantagens significativas em comparação a outros combustíveis fósseis, emitindo cerca de 50% menos poluentes que o carvão mineral e 30% menos que o petróleo. Dessa forma, a pesquisa buscou analisar a vulnerabilidade e a segurança energética em um contexto de dependência de fontes intermitentes e de fatores geopolíticos, enfatizando o papel estratégico do gás natural na matriz energética nacional uma vez que são intermitentes. Para tanto, foi realizada uma revisão de literatura, no período de 2020 e início de 2025, com a busca de artigos, relatórios das principais agências de energia, documentos governamentais e publicações científicas recentes. Assim, verificou-se que a vulnerabilidade energética das fontes intermitentes tem sido amplamente discutida em pesquisas recentes. Embora sejam renováveis e de baixo impacto ambiental, essas fontes enfrentam desafios significativos devido à sua variabilidade e imprevisibilidade, podendo comprometer a confiabilidade do fornecimento de energia, que podem ser minimizadas quando suas instalações são distribuídas de forma geograficamente ampla. Apesar desse fator mitigador, a integração de fontes intermitentes ainda representa desafios para a segurança energética. No contexto geopolítico, as sanções decorrentes do conflito entre Rússia e Ucrânia impactaram significativamente o setor energético global, interrompendo o comércio e os investimentos. De acordo com o levantamento de dados obtidos na pesquisa, essas restrições contribuíram para o aumento da inflação e para a ruptura das cadeias de suprimentos, intensificando os desafios do setor. Assim, houve uma aceleração na transição para fontes renováveis e um aumento na adoção de tecnologias livres de carbono em diversos países. No Brasil, a oferta de gás natural em 2022 passou por mudanças significativas em comparação a 2021. A produção nacional registrou crescimento (48,7 milhões de m³/dia), reduzindo a dependência de importações (14,3 milhões de m³/dia) em maio de 2023. No que tange à segurança energética nacional, o gás natural tem sido fundamental para compensar a variabilidade da geração

hídrica, principalmente em períodos de seca prolongada, garantindo maior estabilidade e confiabilidade ao setor elétrico. O Brasil possui potencial para expandir o consumo de gás natural até 2050 sem aumentar sua dependência externa, aproveitando as reservas do pré-sal e outras fontes nacionais. Além disso, a combinação de um mercado interno sólido e a vantagem competitiva na produção de materiais torna o país um destino atrativo para grandes investimentos em indústrias intensivas em gás natural. Com todos esses cenários, pode-se concluir que a vulnerabilidade das fontes intermitentes e os desafios geopolíticos recentes ressaltam a necessidade de estratégias para garantir a segurança energética. O conflito geopolítico impulsionou a transição global para energias renováveis, enquanto no Brasil, o aumento da produção de gás natural reduziu a dependência de importações e fortaleceu a segurança do setor elétrico. Como fonte estratégica na transição energética, o gás natural promove estabilidade, atrai investimentos e reforça a competitividade nacional, destacando a importância de políticas que equilibrem segurança, sustentabilidade e desenvolvimento econômico.

Palavras-chave: crise energética; política energética; resiliência; risco energético; transição energética.

ABSTRACT

Due to high energy consumption and environmental concerns, the use of solar and wind sources has increased; however, these are intermittent. Natural gas, in turn, has gained prominence in global energy security, being recognized as a transitional source toward a more sustainable energy matrix. In addition to ensuring greater stability in power generation, natural gas offers significant advantages compared to other fossil fuels, emitting approximately 50% less pollutants than coal and 30% less than oil. This research aimed to analyze energy vulnerability and security in a context of dependence on intermittent sources and geopolitical factors, emphasizing the strategic role of natural gas in the national energy matrix. To this end, a literature review was conducted between 2020 and early 2025, including academic articles, reports from major energy agencies, government documents, and recent scientific publications. The study found that the energy vulnerability of intermittent sources has been widely discussed in recent research. Although they are renewable and environmentally friendly, these sources face significant challenges due to their variability and unpredictability, which can compromise energy supply reliability. These challenges can be mitigated when installations are geographically widespread. Despite this mitigating factor, integrating intermittent sources still presents challenges for energy security. In the geopolitical context, sanctions resulting from the conflict between Russia and Ukraine have significantly impacted the global energy sector, disrupting trade and investments. According to the data gathered in this research, these restrictions contributed to rising inflation and supply chain disruptions, intensifying the sector's challenges. As a result, there has been an acceleration in the transition to renewable energy and increased adoption of carbon-free technologies in several countries. In Brazil, the natural gas supply in 2022 underwent significant changes compared to 2021. Domestic production grew (48.7 million m³/day), reducing dependency on imports (14.3 million m³/day as of May 2023). Regarding national energy security, natural gas has been essential in offsetting the variability of hydropower generation, especially during prolonged droughts, providing greater stability and reliability to the electricity sector. Brazil has the potential to expand natural gas consumption until 2050 without increasing external dependency, leveraging pre-salt reserves and other domestic sources. Moreover, the combination of a solid internal market and competitive advantages in material production makes the country an attractive destination for major investments in gas-

intensive industries. Given these scenarios, it can be concluded that the vulnerability of intermittent sources and recent geopolitical challenges highlight the need for strategies to ensure energy security. The geopolitical conflict has driven the global transition to renewable energy, while in Brazil, increased natural gas production has reduced import dependency and strengthened the electric sector's security. As a strategic source in the energy transition, natural gas fosters stability, attracts investments, and enhances national competitiveness, underscoring the importance of policies that balance security, sustainability, and economic development.

Keywords: energy crisis; energy policy; resilience; energy risk; energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de gás natural na Alemanha.....	23
Figura 2: Projeção da evolução da Capacidade Instalada por Fonte de energia de 2025 a 2029	28
Figura 3: principais riscos que ameaçam a sustentabilidade do suprimento de energia elétrica no Brasil.....	30
Figura 4: Transformações de componentes elétricos para uma melhor eficiência e sustentabilidade.....	31
Figura 5: Exemplificação do desempenho superior no retorno das ações das empresas de energia após a imposição das sanções.....	33
Figura 6: Mudanças no comércio global de Gás Natural Liquefeito de 2021 a 2022.....	34
Figura 7: Mudança anual no comércio de gás natural canalizado e no fornecimento global de Gás Natural Líquido, 2019-2025.	35
Figura 8: Projeções da IEA quanto a demanda global de petróleo, 2015-2035.....	37
Figura 9: Oferta Total de Gás Natural no Mercado Nacional	38
Figura 10: Bae da transição energética no Brasil	39
Figura 11: Matriz Energética Nacional - 2023	40
Figura 12: Evolução das Reservas (Provada, Provável e Possível) de Gás Natural (milhões m ³).....	41
Figura 13: Consumo diário de gás natural no Brasil, por setor, entre 2005 e 2020...	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation</i>
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OTAN	Tratado do Atlântico Norte
PNE	Plano Nacional de Energia
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 <i>Objetivos geral e específicos</i>	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 <i>Vulnerabilidade e segurança energética</i>	16
2.2 <i>O gás natural e a transição energética segura</i>	18
2.3 <i>Fontes de energia intermitentes</i>	20
2.4 <i>Geopolítica e vulnerabilidade energética</i>	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 <i>Vulnerabilidade energética das fontes intermitentes</i>	25
4.2 <i>Implicações do conflito entre Rússia e Ucrânia</i>	32
4.3 <i>Segurança energética nacional e o papel estratégico do gás natural</i>	38
5. CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS	46

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mundo vem sofrendo drásticas mudanças, seja ambientais ou sociais, sendo que o consumo energético também passou por transformações. A cada transformação, o aumento do consumo de energia é observado (Fuentes et al., 2020). Assim, ocorrem reflexões quanto as fontes de energia e a segurança de um desenvolvimento sustentável para toda a população, uma vez que elas dependem substancialmente de infraestrutura, desenvolvimento científico e tecnológico. Com isso, a segurança energética ganha mais força no cenário da política energética (Kharrazi et al., 2015; Fuentes et al., 2020; Rabbi et al., 2022).

Nesse contexto de alto consumo de energia, o gás natural vem se destacando cada vez mais quanto a segurança energética mundial por ser considerado uma fonte de transição para uma matriz energética mais sustentável (Teixeira et al., 2021; Barbosa; Moura & Barros Filho, 2024). O gás natural oferece vantagens significativas em relação a outros combustíveis fósseis, emitindo aproximadamente 50% menos poluentes em sua queima do que o carvão mineral e 30% menos do que o petróleo, se tornando uma opção atrativa para a geração elétrica estável (Canton, 2021; Barbosa, Moura & Barros Filho, 2024; Costa et al., 2024).

O contexto global de recuperação pós-pandemia da COVID-19 e persistentes tensões geopolíticas, como os conflitos da Rússia e Ucrânia, tem levado a um expressivo aumento dos preços do gás natural, com pressões significativas sobre a cadeia energética mundial (Lyke, 2024).

De acordo com a LSEG (2025), a produção do gás natural em janeiro de 2025 na Alemanha, Reino Unido, Holanda e Polônia aumentou mais de 10% em relação ao mesmo mês de 2024.

Por outro lado, a grande maioria dos países, inclusive na Europa, está reconsiderando suas fontes de energia. Levantamentos realizados pela Agência Internacional de Energia (IEA) indicam uma revisão para baixo na projeção da demanda global por gás natural até 2025. Devido à guerra na Ucrânia, a demanda caiu 0,5% em 2022, e espera-se apenas um leve aumento de 1,7% até 2025. Segundo a IEA, os conflitos elevaram o preço do gás, o que levou muitos países a recorrerem a outras fontes de energia mais baratas, como o carvão e o petróleo.

Com o cenário atual, muitos países estão reanalisando suas políticas de transição energética, aumentando os investimentos em fontes alternativas de energia, no intuito de buscar um equilíbrio entre a descarbonização e segurança energética (lyke, 2024). Essa transição, por sua vez, é um processo complexo que requer equilíbrio entre a sustentabilidade, a segurança e a equidade (Guix, 2024). No entanto, países que apresentam grande disponibilidade de combustíveis fósseis, acabam buscando uma abordagem “tudo acima”¹, do inglês “*all-of-the-above*”, enquanto os que não têm esses recursos, se concentram em energias renováveis e na redução do consumo (Fuentes et al., 2020).

A transição energética apresenta desafios e oportunidades, especialmente para países em desenvolvimento (Hallack et al., 2023). Uma transição progressiva e uma matriz energética equilibrada são cruciais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover a garantia da sustentabilidade energética sem afetar drasticamente as economias nacionais (Villamizar; Plata & Jimenez, 2023).

Com a contextualização brevemente apresentada, observa-se que deve-se correlacionar as discussões de segurança energética com as iniciativas internacionais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, o Acordo de Paris e o Protocolo de Kyoto.

Os ODS, ao enfatizarem a energia acessível e limpa (ODS 7) e a ação climática (ODS 13), apontam para a importância de estratégias que incentivem a transição para fontes de energia mais sustentáveis. O Acordo de Paris, por sua vez, visa a limitação do aumento da temperatura global, e o Protocolo de Kyoto, com compromissos associados a redução das emissões GEE, favorecem a orientação nas tomadas de decisão dos países na busca por um equilíbrio entre a descarbonização e a segurança energética. Assim, o diálogo entre questões locais e globais, aliado às iniciativas internacionais, estabelece um caminho para o desenvolvimento de políticas energéticas que atendam tanto às necessidades básicas da população quanto aos desafios ambientais globais.

Desse modo, a segurança energética se torna uma temática de relevância para um país e/ou uma nação. Um alto nível de segurança energética garantirá que a

¹ Estratégia ampla e inclusiva no que diz respeito à política energética, a qual propõe utilizar diversas fontes de energia ao mesmo tempo, sem privilegiar exclusivamente uma ou outra. O objetivo é garantir segurança energética, estabilidade econômica e transição sustentável, aproveitando tanto fontes fósseis quanto renováveis

população tenha acesso a condições de bem-estar, além de promover a estabilidade das atividades econômicas e sociais de uma região, permitindo a geração de riqueza e o desenvolvimento social. Assim, a pesquisa justifica-se pela necessidade de intensificar discussões sobre a temática, enfatizando por sua vez, a utilização do gás natural como uma alternativa para a segurança energética.

1.1 Objetivos geral e específicos

Como cerne, a pesquisa busca analisar a vulnerabilidade e a segurança energética em um contexto de dependência de fontes intermitentes e de fatores geopolíticos, enfatizando o papel estratégico do gás natural na matriz energética nacional.

E, como objetivos específicos, busca-se:

- Discutir a vulnerabilidade energética das fontes intermitentes, considerando seus impactos na estabilidade do sistema energético;
- Refletir sobre a vulnerabilidade energética geopolítica, com foco nas implicações do conflito entre Rússia e Ucrânia;
- Analisar a segurança energética nacional e o papel estratégico do gás natural na matriz energética do país.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Vulnerabilidade e segurança energética

Ao introduzir a temática, é fundamental compreender que, quando se tratado de segurança energética, não existe um consenso quanto a sua definição, uma vez que é um assunto complexo e multifuncional (Ang; Choong & Ng, 2015; Chester, 2010; Dannreuther, 2017). Porém, de acordo com Cherp & Jewell (2014) qualquer definição deve responder os questionamentos: "Segurança para quem?", "Segurança para quais valores?" e "Segurança contra quais ameaças?".

Uma das vertentes mais utilizadas vão de acordo com a seguridade da oferta, como por exemplo a disponibilidade energética e preços (Chester, 2010; Kiriya & Kajikawa, 2014; Rabbi et al., 2022). Enquanto outros, voltam-se aos efeitos no mercado do consumidor, como os impactos no bem-estar econômico e social (Lee; Xing & Lee, 2022; Thanh et al., 2023).

Quando também associado à sustentabilidade, Jewell (2011) afirma que uma das formas de se definir *segurança energética* é delinear os diferentes tipos de riscos associados à energia. Essa abordagem refere-se à avaliação de quatro tipos de risco:

- (i) Disponibilidade: aspectos naturais de oferta energética, como formações geológicas com presença de hidrocarbonetos (petróleo, gás natural, entre outros), quantidade de rios e índice pluviométrico de uma região (para a obtenção de energia através dos recursos hídricos);
- (ii) Acesso: fatores que determinam quem terá acesso aos recursos energéticos disponíveis;
- (iii) Viabilidade econômica: questões econômicas e práticas da exploração energética dos recursos naturais;
- (iv) Aceitação social: aspectos de danos ao meio ambiente, danos ao patrimônio, ou rejeição social de algum tipo de fonte específica (Jewell, 2011).

Além da abordagem com os tipos de risco, Ang, Choong & Ng (2015), com a realização de uma extensa revisão de literatura sobre segurança energética, identificaram as sete dimensões principais do tema, sendo elas:

- (i) Disponibilidade energética: a diversificação de fontes de energia e fatores geopolíticos são questões chaves que determinam a disponibilidade energética de um país. Países com maior diversificação de suas fontes energéticas podem mitigar melhor o risco de uma ruptura do seu fornecimento.*
- (ii) Infraestrutura: é fundamental para prover um fornecimento de energia estável e ininterrupto. Essas instalações incluem as plantas de geração de energia, refinarias, linhas de transmissão e distribuição elétrica e dutos, por exemplo.*
- (iii) Preço da energia: determina o acesso a essa energia e seus aspectos são o preço absoluto da energia, sua volatilidade e o grau de competição do mercado de energia em um determinado país.*
- (iv) Efeitos sociais: como energia é uma necessidade básica para a vida, o bem-estar social também foi incluído como uma dimensão de segurança energética em alguns estudos analisados. Nessa dimensão, também são consideradas questões de pobreza energética, quando certos segmentos da população não possuem acesso a uma quantidade mínima de serviço energético.*
- (v) Meio ambiente e sustentabilidade: nessa dimensão são considerados os riscos ambientais associados com a obtenção de energia, como inundações de florestas devido a projetos de hidrelétricas, vazamentos de óleo durante o processo de exploração e transporte do petróleo, emissões de poluentes e de gases de efeito estufa, etc.*
- (vi) Governança: representa o papel do governo em mitigar a ruptura de oferta energética, podendo ser por meio de políticas públicas, processos regulatórios, diplomacia, coleta de dados, etc.*
- (vii) Eficiência energética: são avaliados aspectos de desenvolvimento tecnológico, sistemas inovadores e melhores práticas que auxiliam na redução da intensidade energética (ou aumento da eficiência energética) de um país.*

De modo breve, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), conceitua a segurança energética como a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço acessível. Blum & Legey (2012) destacam que, além da dualidade relacionada

a segurança da procura e a oferta, a segurança energética geralmente se define por meio de dimensões, como a sustentabilidade de oferta.

Em resumo com os contextos apresentados, a segurança energética pode ser associada como a capacidade de um país, ou região, em mitigar os riscos ligados à ruptura na oferta de energia, à falta de acesso da população no que diz respeito a essa energia, além dos prejuízos ambientais de sua produção, transporte e uso. Assim, Ang, Choong & Ng (2015) destacam que, por meio desses aspectos, é possível estabelecer relações com o conceito de vulnerabilidade energética.

Para uma melhor compreensão, é fundamental entender que a conceituação de vulnerabilidade, mesmo que não se tenha uma definição comum (Giupponi & Biscaro, 2015; Nascimento, 2024), é uma ferramenta analítica para identificação de suscetibilidade a danos e fragilidades do sistema. Além de corroborar para uma análise que busque a redução acentuada do risco. Sendo assim, Adger (2006) descreve a vulnerabilidade relacionada a três principais componentes. Sendo eles:

- (i) Exposição: magnitude, frequência, duração e extensão de um determinado evento em que um sistema é exposto;
- (ii) Sensibilidade: grau em que esse sistema é modificado ou perturbado por esse evento;
- (iii) Capacidade adaptativa: capacidade desse sistema evoluir e acomodar as mudanças ocasionadas por tal evento.

Em síntese, a vulnerabilidade pode ser compreendida como uma questão de insegurança, envolvendo diversas disputas e conflitos. Assim, uma análise de vulnerabilidade pode e deve incorporar uma combinação de parâmetros qualitativos e quantitativos (Adger, 2006). Dessa forma, a vulnerabilidade energética pode ser vislumbrada como a ausência de segurança energética, ou a incapacidade de se adaptar aos riscos associados a ela, conforme as dimensões de análise propostas por Ang, Choong & Ng (2015).

2.2 O gás natural e a transição energética segura

Dentre o cenário atual, o gás natural apresenta papel importante no quesito de segurança energética, uma vez que ele oferece menores emissões de GEE's e

permite complementar as energias renováveis. Com isso, estima-se que a participação do gás natural seja de 24% até 2040 na matriz energética global (Losz & Elkind, 2019; Mohammed et al., 2024).

O gás natural é considerado um “combustível ponte” na transição para fontes de energias mais limpas, uma vez que as renováveis ainda não conseguem satisfazer por completo a procura energética (León & Scipio-Cimetta, 2022). Porém, seu consumo se relaciona de forma positiva com as emissões de CO₂ (Thalassinos et al., 2022).

É importante destacar que a utilização do gás natural é voltada principalmente como insumo da geração de energia elétrica, de forma segura e estável. Assim, prevê-se que essa utilização ocorra até a substituição por possíveis novos modelos de geração sustentável (Costa et al., 2024). Os autores ainda destacam que a segurança da rede de gás natural é fundamental no que tange a implementação da matriz energética, uma vez que ela irá amparar o crescimento econômico a qual tem impactos diretos na matriz social de uma nação.

O gás natural é uma substância gasosa, sendo assim, ele apresenta facilidades quanto ao seu manuseio e utilização (Almeida, 2020). Essas facilidades e vantagens, de acordo com Costa et al. (2024), são suficientes para fazer com que o gás seja adotado. Mas, é fundamental compreender que, mesmo apresentando essas vantagens existe uma complexidade quanto a instalação de suas usinas.

Gürsan & De Gooyert (2020) destacam que as usinas de gás natural exigem investimentos significativos em infraestrutura, incluindo gasodutos, instalações para processamento do combustível e sistemas de armazenamento. Quando já existe uma rede de gasodutos, diversas outras usinas podem usufruir dessa estrutura. No entanto, na ausência desses dutos, o gás natural precisa ser convertido em formas transportáveis, como o GNL (Gás Natural Liquefeito).

A construção de gasodutos reduz os custos de transporte, tornando futuros investimentos em usinas de gás natural mais viáveis. Consequentemente, essas usinas se tornam opções mais atrativas para investidores. Da mesma forma, a instalação de novas usinas pode incentivar o desenvolvimento da infraestrutura de gás natural, ajudando a reduzir os custos. Esse mecanismo cria um ciclo de reforço, onde um aumento inicial em uma variável impulsiona novas elevações por meio das outras variáveis. O inverso também pode ocorrer, onde existe uma redução inicial em

uma variável que pode desencadear quedas adicionais nas demais (Gürsan & De Gooyert, 2020).

Compreendendo que, por mais que o gás natural consiga auxiliar na redução das emissões em curto prazo, algumas investigações e precauções são visualizadas em relação ao seu efeito a longo prazo, como por exemplo a possibilidade de exclusão de investimentos quanto as energias renováveis (Gürsan & De Gooyert, 2020). Por outro lado, o Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas de Energia e Petróleo (Inep) do Brasil, entende que a transição energética depende de fatores que envolvem a ação de Estados Nacionais e também de maiores fontes no setor energético.

2.3 Fontes de energia intermitentes

As fontes de energia intermitentes são consideradas como aquelas que produzem eletricidade, mas podem variar com o passar do tempo, seja por influência de condições naturais ou climática (Pastor; Macêdo, 2020). As mais conhecidas fontes intermitentes são a energia solar e a eólica.

Com o passar dos anos, essas fontes têm se tornado cada vez mais popular e acessível, passando a ser uma boa alternativa sustentável em relação a utilização de combustíveis fósseis, mesmo apresentando desafios e peculiaridades na gestão de produção e distribuição. Em regiões mais remotas, como a Amazônia, essas fontes podem ser viáveis tecnicamente e economicamente, além de oferecer uma maior confiabilidade (Blasques et al., 2011).

A geração de energia a partir dessas fontes apresenta duas características principais, de acordo com o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT Energy, 2012):

- (i) Variabilidade: refere-se à flutuação ao longo do tempo na disponibilidade dos recursos para a geração de energia;
- (ii) Imprevisibilidade: relaciona-se à impossibilidade de prever com antecedência a disponibilidade desses recursos.

Conforme supracitado, a intermitência refere-se à variabilidade limitada e à imprevisibilidade de um recurso utilizado para a geração de energia. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma fonte de energia intermitente é

definida como "um recurso energético renovável que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração, não pode ser armazenado em sua forma original" (Resolução Normativa ANEEL N° 83 de 20/09/2004, 2004). Isso significa que a geração de energia depende da disponibilidade do recurso naquele momento específico.

À medida que a capacidade de geração por fontes renováveis intermitentes como solar e eólica cresce, os desafios operacionais e econômicos para manter a estabilidade do sistema também aumentam (MIT, 2012). Em nível global, há uma tendência crescente de implementar políticas públicas que incentivem a expansão da geração elétrica por meio de fontes renováveis intermitentes, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE's, conforme visto. Porém, esse crescimento precisa ser realizado com planejamento, para garantir a vulnerabilidade e a segurança energética sejam devidamente tratados.

2.4 Geopolítica e vulnerabilidade energética

O conflito entre a Rússia e a Ucrânia, iniciado em 2022, favoreceu o debate sobre a segurança energética dos países e como vários fatores podem influenciar a avaliação do grau de dependência energética externa de uma nação. Uma abordagem útil para analisar e quantificar essa dependência é a utilização de indicadores, como por exemplo a proporção entre a quantidade de energia importada e consumida internamente, os riscos políticos nos países fornecedores, as ameaças no transporte de energia e a importância econômica de determinada fonte no consumo nacional (Le Coq & Paltseva, 2009).

As questões de segurança energética, especialmente no que diz respeito à importação de energia, não se limitam apenas a aspectos econômicos, mas também envolvem fatores políticos e negociações, sendo fortemente influenciadas pelas instabilidades geopolíticas e sociais dos países fornecedores (Roller et al., 2007; Van der Linde et al., 2005). Um grande exemplo atual é a postura da Alemanha frente o conflito entre a Rússia e a Ucrânia.

A resposta da Alemanha à invasão da Ucrânia pela Rússia marcou uma mudança de caráter decisivo em sua tradicional *Ostpolitik*², comprometendo-se a apoiar a Ucrânia e a impor sanções econômicas à Rússia (Stent, 2022). Porém, o progresso da Alemanha neste direcionamento tem se mostrado misto. As entregas militares para a Ucrânia ocorreram de forma mais lenta do que o esperado, e surgiram preocupações sobre a sustentação do apoio público, especialmente com a chegada do inverno, quando a crise energética se agrava (Stent, 2022).

Os projetos do gasoduto *Nord Stream*, impulsionados pela Alemanha, fortaleceram os laços econômicos entre Alemanha e Rússia. No entanto, segundo Umland (2022), esse estreitamento contribuiu para o enfraquecimento das relações entre Rússia e Ucrânia, o que pode ter alimentado a escalada do conflito. A Alemanha, que antes era fortemente dependente do gás russo para suprir sua demanda energética, passou a ter seu papel questionado por ter apoiado esses projetos, especialmente com o agravamento da guerra.

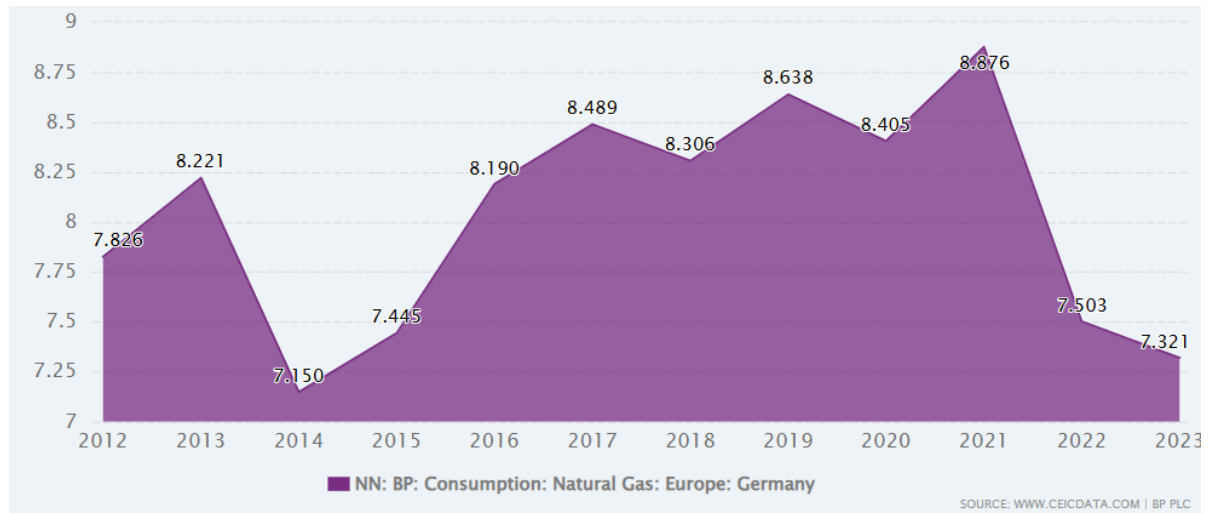
Assim, alguns estudos pontuam que a OTAN (Organização do Tratado do Atlântico Norte) deveria declarar uma mora sobre a adesão de novos membros e negociar a neutralidade militar da Ucrânia. Essa proposta, de acordo com Mielniczuk (2022) visaria amenizar o conflito sem expandir ainda mais a presença militar da aliança no Leste Europeu.

Em resumo, esses fatores conseguem ilustrar brevemente a complexidade das dinâmicas geopolíticas e as dificuldades enfrentadas pela Alemanha, que tenta equilibrar seu apoio à Ucrânia junto as suas preocupações com as consequências econômicas e sociais da crise energética.

Em números, é possível visualizar o impacto do conflito para a Alemanha no consumo do gás natural, de acordo com dados disponibilizados pelo Global CEIC (2024) (Figura 1) Destaca-se que, no ano de 2014 houve uma queda expressiva devido a participação da energia solar, eólica e hidrelétrica na matriz elétrica alemã ultrapassar os 30%. Assim, foi reduzida a necessidade de geração de térmica, a qual é atendida pelo gás natural

² Considerada política externa da Alemanha Ocidental, iniciada no final da década de 1960, principalmente sob a liderança do chanceler Willy Brandt. Essa política tinha como objetivo normalizar e melhorar as relações com os países da Europa Oriental, especialmente com a Alemanha Oriental, promovendo o diálogo e a cooperação em vez da confrontação.

Figura 1: Consumo de gás natural na Alemanha



Fonte: Global CEIC (2024)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A fins metodológicos, a pesquisa fez uso da revisão de literatura e documental para obter as informações necessárias para reflexão e alcance dos objetivos propostos. Essa metodologia, por sua vez, tem como objetivo investigar as contribuições científicas mais relevantes de um determinado tema, nesse caso sobre o papel do gás natural na transição energética segura.

A pesquisa foi realizada durante o ano de 2024 e início de 2025, com a busca de artigos acadêmicos, relatórios institucionais das principais agências de energia, documentos governamentais e publicações científicas recentes. Deu-se preferência as publicações de 2020 a 2025 devido a necessidade de atualidade da temática.

É importante destacar que, uma revisão bibliográfica como a proposta, é fundamental para contextualizar, identificar os componentes conceituais e estimular possíveis novos estudos, por meio da identificação de desafios e lacunas existentes em temáticas de estudo (Carvalho, 2020). Ainda, com essa metodologia, é possibilitado a sistematização de informações, fazendo com que, de acordo com Escudero (2020), haja a construção de argumentos e propostas de novas perspectivas de abordagens sobre a temática, sem, no entanto, se limitar a esse período, uma vez que materiais citados por outros se mostraram importantes para o trabalho.

Para a realização das buscas, foram utilizadas palavras-chave como “segurança energética”, “transição energética”, “gás natural”, “conflitos geopolíticos”, “fontes intermitentes”. Além de realizar a busca com apenas uma palavra-chave, também foram realizadas combinações entre ela para um melhor êxito de buscas. Ainda, fez-se o uso de plataformas como Google Scholar (em busca avançada) e Periódicos Capes para buscar os artigos científicos. Além disso, foi realizada a busca ativa de documentos e/ou relatórios em agências oficiais como IEA e Inep.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Vulnerabilidade energética das fontes intermitentes

A vulnerabilidade energética associada às fontes intermitentes, como a energia eólica e solar, tem ganho cada vez mais espaço de discussão em pesquisas recentes. Essas fontes, por mais que sejam renováveis e de baixo impacto ambiental, apresentam desafios constantes relacionados à sua variabilidade e imprevisibilidade, podendo acarretar prejuízos quanto a sua estabilidade e a segurança do sistema elétrico (Freire, 2024; Giacobbo, 2024).

A energia solar apresenta um padrão de geração influenciado pelo ciclo diurno e pelas variações sazonais, apresentando picos de produção geralmente ao meio-dia e durante o verão, devido à alta incidência solar. Esse comportamento, de acordo com Mills (2009) e Engerer & Mills (2014), a torna bem alinhada com a demanda máxima de muitos sistemas elétricos. Porém, sua geração ainda é considerada variável e incerta. Segundo Perez-Arriaga & Battle (2012), a posição do sol impacta diretamente a produção de energia ao longo do dia e das estações, enquanto a movimentação das nuvens pode provocar flutuações rápidas na geração das placas fotovoltaicas.

Devido à falta de inércia física em sistemas fotovoltaicos, rápidas mudanças na geração de energia podem ser observadas nesses sistemas. Estudos térmicos demonstram que pequenas variações de temperatura podem resultar em ganhos expressivos de desempenho no sistema. Por exemplo, Zwirter & Wanderley (2022) evidenciaram que um sistema fotovoltaico/térmico (PV/T) com rastreamento de eixo duplo reduziu a temperatura média em 2,5 °C, aumentando a produção elétrica em 37,86%. Da mesma forma, um sistema de resfriamento a água reduziu a temperatura para 22 °C, o que elevou a eficiência em 1,61% e a produção de energia em 15,36% (de 98,17 W para 113,25 W).

Outras pesquisas indicam que temperaturas superiores a 25 °C estão associadas a uma queda de eficiência de 0,45% por grau ou até a uma redução de 15% nas eficiências de energia e exergia³ (Costa Junior et al., 2022; Jurinic et al., 2022). Além disso, Busson et al. (2022) destaca que um sistema integrado a edifícios

³ Parte da energia que pode ser realmente usada para fazer algum trabalho útil

registrou um aumento de temperatura em 3,3 °C, resultando em uma queda de 32% na eficiência em comparação com as condições de teste padrão.

Esses resultados, baseados em métodos experimentais, estudos de campo e simulações em suas diferentes escalas, destacam a importância do gerenciamento para otimizar o desempenho. Por outro lado, é fundamental destacar que uma distribuição geográfica mais ampla desses sistemas pode mitigar os impactos das condições meteorológicas sobre a geração elétrica, tornando a produção mais estável e reduzindo a variabilidade (Hoff & Perez, 2010; Perez-Arriaga & Battle, 2012), mas não é possível eliminá-la.

Estudos do Brasil, com um relatório global⁴, comparam a eficiência energética solar e eólica em termos técnicos, econômicos e ambientais. Uma simulação de uma fazenda híbrida de 30 MW calcula uma configuração ótima de 1 MW solar para 3,75 MW eólicos (Beltrán-Telles et al., 2017). Dados do fator de capacidade relatam 24% para energia solar fotovoltaica *versus* 36,6% para sistemas eólicos (Silva et al., 2024). Essa medida de capacidade indica quanto uma usina, ou equipamento de geração de energia, realmente produz de eletricidade ao longo do tempo em comparação com sua produção máxima possível.

Ao realizar análises econômicas, Moreira et al. (2024) identificaram que o custo nivelado de energia, que representa o valor médio necessário para gerar 1 MWh de eletricidade ao longo da vida útil de uma usina, incluindo investimentos, operação e manutenção, foi estimado em 263,05 R\$/MWh para a energia solar e 254,70 R\$/MWh para a energia eólica. Enquanto Silva et al. (2024) destacou o custo de instalação solar de 1.040 R\$/kW e despesas operacionais de 13 R\$/kW-ano, enquanto a energia eólica tem custos relatados cerca de 1,66% menores.

De acordo com Ruiz et al. (2022), medidas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) indicam que a ecoeficiência, um indicador que relaciona o desempenho ambiental com o valor econômico gerado, mostrando o quanto de impacto ambiental é evitado por unidade de benefício, é de 87,2% para a energia solar e 97,6% para a energia eólica. Esses resultados demonstram que ambos os sistemas possuem alto potencial competitivo, especialmente quando comparados às fontes baseadas em

⁴ Assessing Hybrid Solar-Wind Potential for Industrial Decarbonization Strategies: Global Shift to Green Development

combustíveis fósseis, sendo que a energia eólica apresenta uma leve vantagem ambiental e econômica sobre a solar.

Lopes (2022) ao realizar uma pesquisa acerca de parques eólicos, verificou os possíveis efeitos da redução instantânea da potência ativa advinda dos parques no Nordeste do Brasil, destacando os impactos na estabilidade do sistema elétrico. Assim, a autora destaca a necessidade de atenção dos agentes do sistema para manter o equilíbrio entre geração e carga, devido a natureza intermitente da geração eólica.

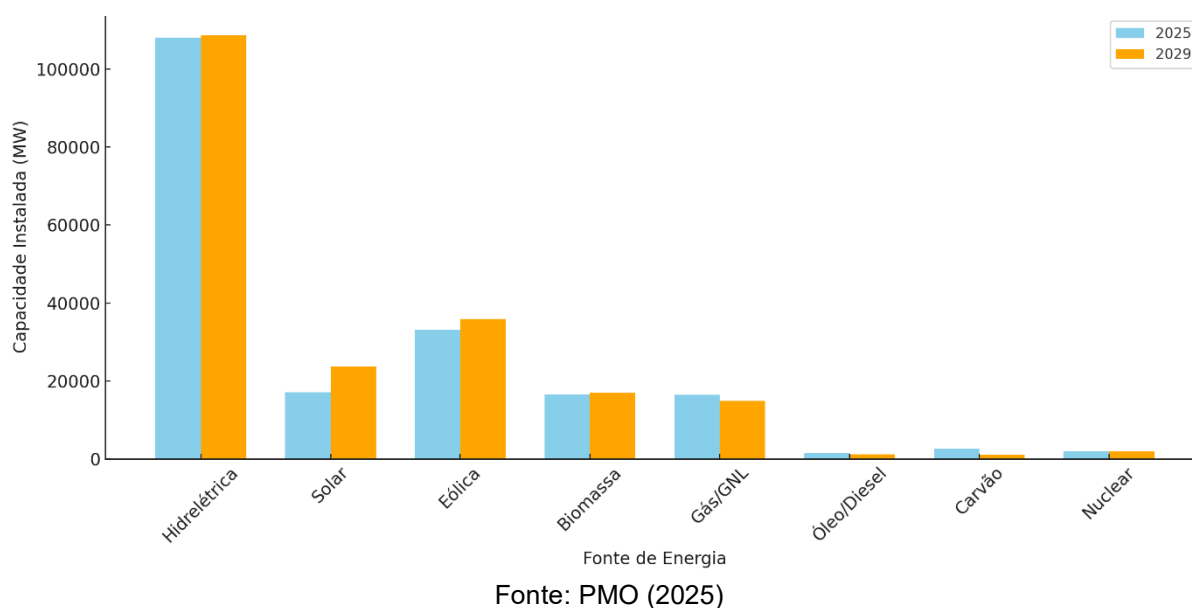
A integração de fontes de energia intermitentes, como a solar e a eólica, continua a apresentar desafios significativos para a estabilidade e segurança dos sistemas elétricos. De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2024), a crescente participação dessas fontes na matriz energética exige uma transformação estrutural dos sistemas de energia para garantir um fornecimento confiável.

A integração de fontes renováveis intermitentes também estabelece desafios quanto à rede de transmissão. A inserção de geradores de menor porte, distribuídos pelo país, requer uma rede mais flexível e robusta para lidar com frequentes mudanças de direção de fluxos de energia e diferentes tipos de distúrbios no Sistema Interligado Nacional (SIN) (Sava, 2017).

É importante destacar que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), entidade responsável por coordenar e controlar a geração e transmissão de energia elétrica no Brasil, realiza projeções sobre a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN), que é a malha de usinas e linhas de transmissão que conecta quase todas as regiões do país, permitindo o fornecimento e o intercâmbio eficiente de energia elétrica entre os estados.

Na Figura 2 é possível visualizar como o PMO (2025), espera que o SIN evolua de 2025 a 2029.

Figura 2: Projeção da evolução da Capacidade Instalada por Fonte de energia de 2025 a 2029



O ONS também prevê que a carga de energia do SIN crescerá em média 3,2% ao ano entre 2024 e 2028.

No contexto brasileiro, Caldeira (2023) avaliou a viabilidade de implantar usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) como estratégia para recuperar os níveis dos reservatórios de hidrelétricas existentes, utilizando energia solar fotovoltaica como fonte para o bombeamento da água. Essa proposta ganha ainda mais relevância diante dos dados apresentados na Figura 2, que mostram a manutenção da capacidade instalada hidrelétrica entre 2025 e 2029 e, ao mesmo tempo, um crescimento expressivo da energia solar no mesmo período. Essa tendência sugere um cenário propício para integrar fontes intermitentes, como a solar, com sistemas de armazenamento hídrico reversível, aumentando a flexibilidade e a confiabilidade do SIN. A autora constatou que uma UHR pode mitigar a intermitência de fontes renováveis e consequentemente aumentar a segurança energética, especialmente quando associada a tarifas elevadas para remuneração do sistema de armazenamento.

Por outro lado, Lima, Alves & Marengo (2023), por meio de relatório técnico ao IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente) sediado em São Paulo, apontaram que o Brasil ainda não possui uma política concreta para enfrentar os impactos das mudanças climáticas sobre seu sistema elétrico. Os autores alertam que, ao não considerar adequadamente as alterações no clima, o planejamento elétrico nacional

pode enfrentar desafios, obrigando a adoção de medidas emergenciais que encarecem e poluem a matriz energética.

Corroborando com Lima, Alves & Marengo (2023), o Tribunal de Contas da União (TCU, 2024) identificou que o planejamento atual do setor elétrico não contempla adequadamente soluções técnicas para lidar com a intermitência dessas fontes e os impactos das mudanças climáticas. Essa lacuna pode comprometer a previsibilidade e a disponibilidade de recursos hídricos, essenciais para a matriz energética do país.

As fiscalizações do TCU revelaram que a ausência de indicadores e metas claras para a operação eletroenergética compromete diretamente a eficiência operacional, a segurança do sistema e a otimização de recursos. Além disso, a falta de transparência nas decisões do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) sobre a ordem de acionamento das usinas afeta o controle social e pode elevar encargos tarifários, dependendo dos direcionamentos e escolhas dadas.

Outro fator que contribui para a ineficiência da operação elétrica é a inexistência de um plano estratégico de contingência para crises, como grande exemplo a seca de 2021 ocorrida em grande parte do país. Sem diretrizes bem definidas para emergências, os agentes do setor ficam limitados a medidas improvisadas, muitas vezes mais custosas e menos eficazes.

O TCU também identificou que o planejamento do setor elétrico brasileiro, que é de responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), acaba não contemplando soluções técnicas adequadas para a crescente participação de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, nem para os impactos das mudanças climáticas. Essas lacunas reduzem a previsibilidade da oferta de recursos hídricos e comprometem a segurança e a eficiência do sistema no longo prazo, evidenciando falhas de governança e planejamento estratégico.

O resumo relacionado aos principais riscos que ameaçam a sustentabilidade do suprimento de energia elétrica no Brasil, podem ser visualizados na Figura 3.

Figura 3: principais riscos que ameaçam a sustentabilidade do suprimento de energia elétrica no Brasil.

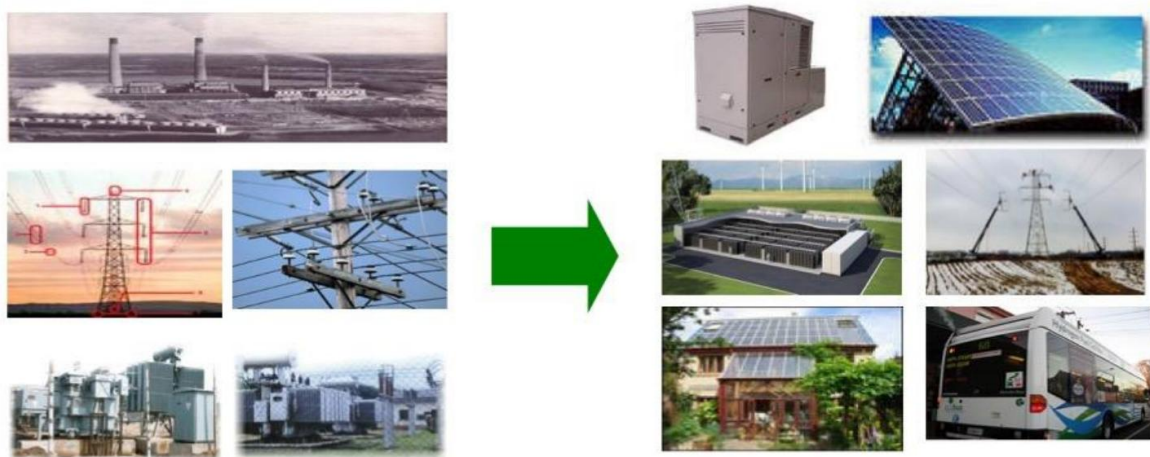
Causas	Riscos	Efeitos
Aumento da ocorrência de eventos climáticos extremos. Subdimensionamento das redes de energia elétrica para suportar condições climáticas extremas. Falta de manejo preventivo da vegetação próxima à rede elétrica. Insuficiência de ações coordenadas entre as empresas de energia e os órgãos governamentais locais.	Aumento na quantidade de interrupções prolongadas no fornecimento de energia elétrica. Aneel	Uso ineficiente dos recursos hídricos, com exaustão precoce de reservatórios em período de seca ou escoamento da água pelo vertedouro, sem produzir energia. Redução da confiabilidade do sistema elétrico nacional em momentos de alta demanda e escassez hídrica. Aumento na frequência de falhas e interrupções no fornecimento de energia. Insegurança para a operação das empresas geradoras, distribuidoras e comercializadoras de energia. Contratação de fontes mais caras (térmicas) ou inadequadas às necessidades do sistema elétrico brasileiro. Operação do Sistema Integrado Nacional mais complexa e desafiadora. Aumento nos custos de energia. Impactos negativos na economia, no meio ambiente e na vida das pessoas.
Carência de metas e indicadores para medir o sucesso na operação do sistema elétrico. Falta de transparência na decisão de acionar usinas mais caras durante falhas no sistema que deixam áreas sem energia, em vez de priorizar as usinas mais baratas. Falta de plano de contingência para lidar com crises de fornecimento de energia.	Ineficiência e ineficácia da operação eletroenergética. Aneel MME CMSE	
Falta de soluções técnicas para lidar com os desafios da transição energética e das mudanças climáticas, como integrar mais fontes de energia intermitentes (solar e eólica) e enfrentar mudanças nos padrões de precipitação.	Diminuição da previsibilidade na operação eletroenergética. MME	
Aumento do consumo de energia elétrica pelo Paraguai. Falta de preparação do Brasil para negociar com o Paraguai a revisão do Anexo C do Tratado de Itaipu (bases financeiras e prestação de serviços de eletricidade).	Redução da energia da Usina Hidrelétrica de Itaipu disponível para o Brasil. MME	
Gestores Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) Ministério de Minas e Energia (MME)		

Fonte: TCU (2024)

Para mitigar os efeitos da intermitência, algumas estratégias têm sido implementadas globalmente. Entre elas, pode-se destacar o armazenamento de energia, a diversificação das fontes energéticas e a modernização das redes elétricas.

O armazenamento de energia, por exemplo, permite acumular o excedente gerado em períodos de alta produção para uso em momentos de baixa geração, contribuindo para a estabilidade do sistema (Sayed et al., 2023; Zhou et al., 2019). A diversificação das fontes de energia, incluindo a adoção de tecnologias de baixo carbono e a integração de diferentes fontes renováveis, pode reduzir a vulnerabilidade associada à intermitência (Triguero-Ruiz et al., 2023). Enquanto a modernização das redes elétricas, com a implementação de tecnologias inteligentes, também é crucial para gerenciar de forma eficiente a variabilidade na geração e no consumo de energia (Henderson et al., 2017; Reynolds et al., 2016). Para melhor visualizar essas transformações, a Figura 4 exemplifica algumas possíveis transformações de componentes elétricos para uma melhor eficiência e sustentabilidade.

Figura 4: Transformações de componentes elétricos para uma melhor eficiência e sustentabilidade



Fonte: Henderson et al. (2017)

Quando observada as mitigações da intermitência no Brasil, é importante destacar que a concentração da geração eólica e solar nas regiões Nordeste e Sudeste impõe desafios operacionais significativos. A variabilidade dessas fontes acaba dificultando o equilíbrio entre oferta e demanda, impactando a estabilidade do sistema. Esse cenário se torna ainda mais complexo com o avanço da geração distribuída e a crescente presença de recursos baseados em inversores (IBR), que exigem novas abordagens de planejamento e operação (Mello et al., 2025; Rizetti, 2023)

Entre os principais desafios, destaca-se a redução da inércia do sistema devido à menor participação de fontes síncronas, o que aumenta a taxa de variação de frequência (RoCoF) e compromete os limites de estabilidade. Além disso, a intermitência das fontes renováveis reforça a necessidade de previsões mais precisas e de maior flexibilidade no despacho da geração. A integração dos Operadores de Sistemas de Distribuição ao ONS também se torna essencial para coordenar os recursos distribuídos de forma eficiente (Mello et al., 2025; Picolli, 2021).

Para enfrentar esses desafios, o Brasil tem adotado soluções estratégicas. De acordo com Mello et al. (2025) investimentos em infraestrutura estão fortalecendo a rede de transmissão para suportar as demandas futuras, enquanto atualizações regulatórias e técnicas aprimoram a segurança e a confiabilidade da conexão de geradores renováveis. Essas medidas são fundamentais para garantir um sistema elétrico mais resiliente, sustentável e eficiente.

Embora as fontes renováveis intermitentes sejam indispensáveis para a transição energética e a descarbonização da economia, sua integração eficiente ao sistema elétrico requer soluções tecnológicas e estratégicas, conforme discutido. O armazenamento de energia, a modernização da rede elétrica e a diversificação da matriz são elementos fundamentais para mitigar as vulnerabilidades energéticas dessas fontes. Assim, é possível garantir um fornecimento confiável e seguro de eletricidade, promovendo um futuro sustentável e resiliente para o setor energético global.

4.2 Implicações do conflito entre Rússia e Ucrânia

Uma das principais implicações relacionadas entre o conflito entre a Rússia e Ucrânia são as sanções. De acordo com Nguyen et al. (2024) as sanções apresentam impacto significativo no setor de energia durante períodos de tensão geopolítica, interrompendo o comércio e o investimento. Esse rompimento acaba elevando os preços das *commodities*, como exemplo do petróleo e gás, à medida que os mercados se ajustam à oferta reduzida. Segundo os autores, em muitos dos casos, pode ocorrer o benefício de empresas do setor energético, impulsionando seus lucros frente a escassez de recursos. Na prática, tem-se o exemplo da aplicação de sanções contra grandes exportadores de energia, como a Rússia, que acaba demonstrando como conflitos geopolíticos podem redesenhar a dinâmica do mercado e influenciar o desempenho das ações do setor (Hatpoglu et al., 2023).

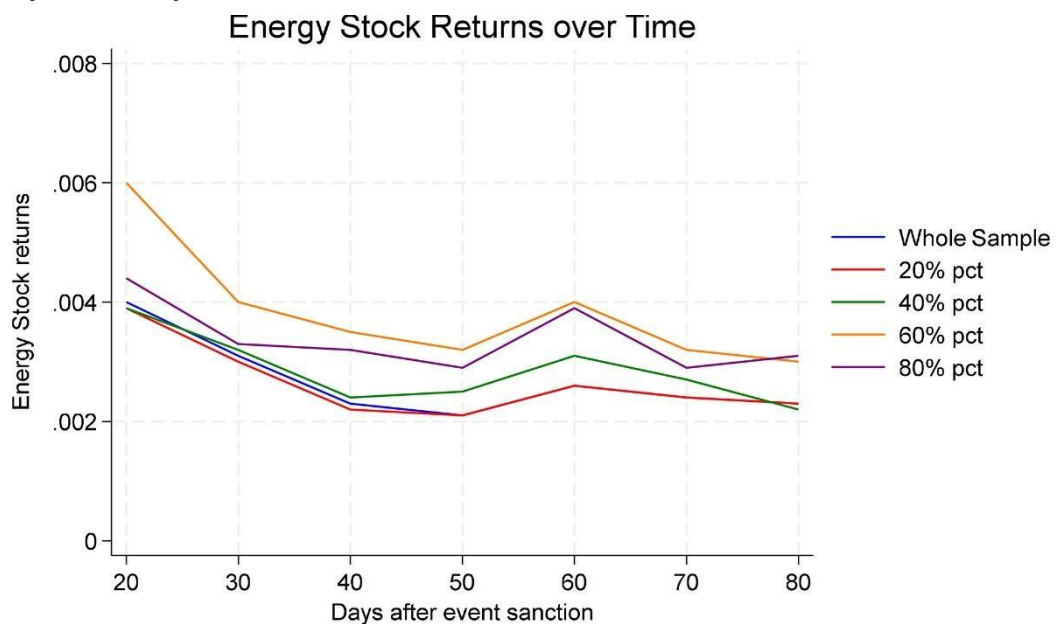
Zuk (2023) destaca que o conflito na Ucrânia gerou impactos profundos e a longo prazo em diversas esferas da sociedade a nível global, influenciando políticas energéticas, questões ambientais, dinâmicas econômicas e cenários políticos. Além de reconfigurar a geopolítica mundial, a guerra tem servido como catalisador para mudanças nas relações entre governos, empresas e funcionários em diversos países da Europa, fazendo com que ocorresse uma redefinição de regulamentações, estratégias econômicas e alianças internacionais.

A guerra entre Rússia e Ucrânia, juntamente com as sanções subsequentes do conflito, teve um impacto significativo no desenvolvimento das energias renováveis e na redistribuição das fontes de energia (Zuk & Zuk, 2022). Em resposta à crise energética, Misik & Nosko (2023) destacam que muitos dos países europeus tenderam a aumentar seus esforços e investimentos em alternativas de

energia mais sustentáveis. Além disso, segundo Nguyen et al. (2024), as sanções afetaram enfaticamente o setor energético global, acarretando maiores inflações e interrupções nas cadeias de suprimentos. Esse cenário, por sua vez, acelerou a transição mundial para fontes de energia renováveis, impulsionando a adoção de tecnologias livres de carbono em diversos países.

Nesse contexto, Nguyen et al. (2024) avaliaram o efeito das sanções, por meio de uma análise quantitativa, na tentativa de verificar a dinâmica do tempo frente os efeitos das sanções e a dependência existente em relação a importação do petróleo, o quão elas afetam os retornos das ações de energia. Sendo assim, na Figura 5 é possível visualizar que as linhas representam os efeitos médios do tratamento ao longo dos dias em torno da data do evento, considerando diferentes níveis de dependência da importação de petróleo nos países afetados. Especificamente, essas linhas mostram o impacto médio das sanções nos retornos das ações de empresas de energia, divididas de acordo com o grau de dependência de cada país em relação ao petróleo importado. Sendo assim, os gráficos para 20% e 40% remetem aos retornos das ações em países com menor dependência, enquanto 60% e 80% mostram os efeitos sobre empresas localizadas em países com maior vulnerabilidade à importação de petróleo.

Figura 5: Exemplificação do desempenho superior no retorno das ações das empresas de energia após a imposição das sanções



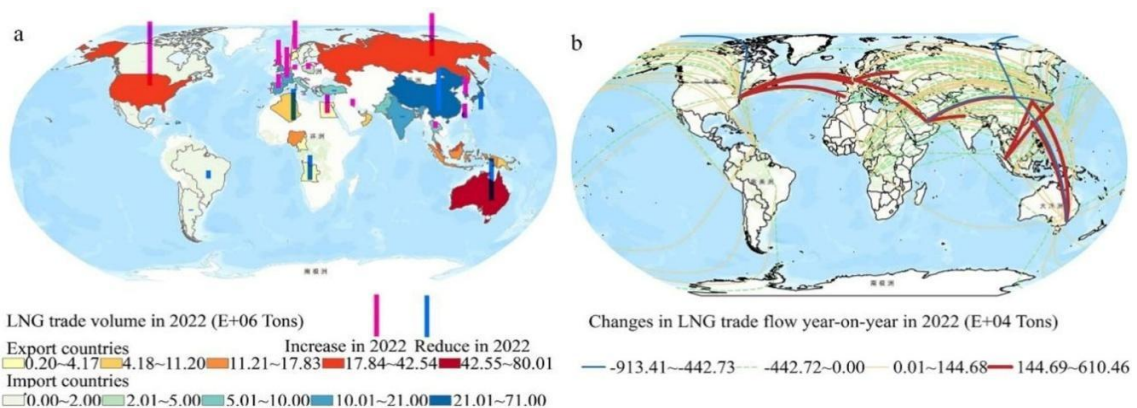
Fonte: Nguyen et al. (2024)

Frente o contexto atual, é importante destacar que a Rússia é o segundo maior produtor mundial de gás natural, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. De acordo com Sullivan & Northam (2022), é a Rússia quem fornece aproximadamente 40% do gás da Europa. Ainda, um terço da demanda de gás existente na União Europeia é para subsidiar a geração de energia, produção industrial e aquecimento quando se está no inverno. Assim, e acrescido com mais de 25% de importação de petróleo bruto da Rússia, a União Europeia se torna extremamente dependente dos combustíveis fósseis russos (Hosseini, 2022).

De acordo com dados levantados por Hosseini (2022), só no 2021, a União Europeia importou, em média, mais de 380 milhões de m³ diários de gás natural da Rússia por gasoduto, totalizando cerca de 140 bilhões de m³ ao longo do ano. Além disso, aproximadamente 15 bcm (bilhões de metros cúbicos) foram adquiridos na forma de gás natural liquefeito. Porém, o autor destaca que a dependência dos países da União Europeia em relação aos combustíveis fósseis russos acaba variando significativamente. Enquanto países como Espanha e Portugal utilizam quantidades menores, economias maiores, como a Alemanha, dependem fortemente dessas importações, obtendo mais de 30% de seu petróleo bruto e cerca de 50% de gás natural da Rússia.

Corroborando com as informações de Hosseini (2022), Xiao et al. (2025) destacam esse cenário da rede de comércio do gás natural liquefeito. Os autores informam que de 2021 a 2022, ocorreu um aumento no volume médio de GNL negociado em nível nacional. E que, o conflito entre a Rússia e a Ucrânia acabou acarretando a crise de fornecimento de energia na Europa, fazendo com que muitos países aumentassem suas importações de GNL, conforme visto na Figura 6.

Figura 6: Mudanças no comércio global de Gás Natural Liquefeito de 2021 a 2022.

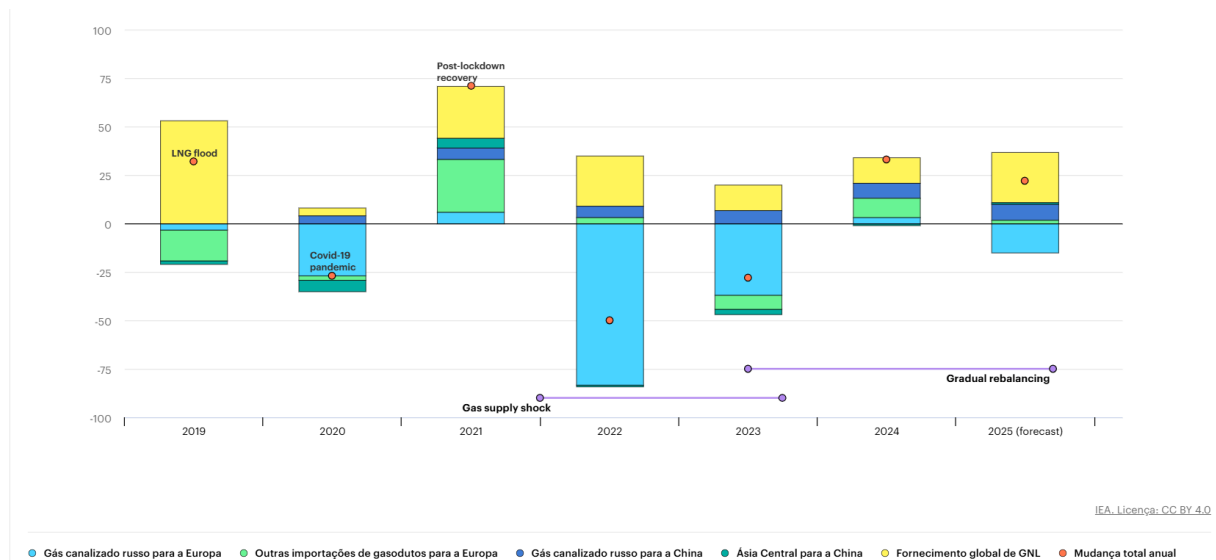


Fonte: Xiao et al. (2025)

A dependência energética da Europa em relação ao gás natural russo está passando por transformações significativas. De acordo com a IEA (2025), em 2024, a União Europeia aumentou suas importações de gás natural liquefeito da Rússia, que agora representam aproximadamente 20% do total de importações. Esse percentual apresenta um expressivo aumento, quando observado que em 2023 estava em 6%. Mesmo com esse crescimento notável, Fatih Birol – diretor da IEA, recomendou que os países europeus buscassem algumas outras alternativas, como por exemplo o Catar a partir de 2027. Birol destaca a necessidade de diversificar as fontes de energia para consequentemente reduzir a dependência do gás russo em longo prazo.

Quando visualizado o cenário atual do consumo de gás natural no mundo, de acordo com o IEA (2025), o consumo voltou a crescer em 2024. Assim, a demanda por gás deve se manter em crescente nos próximos anos, devido principalmente ao apoio do mercado asiático, ocorrendo mudanças no padrão de comercialização (Figura 7). Mas, é fundamental retomar a discussão relacionada aos conflitos geopolíticos que em um balanço global, torna o gás natural frágil com grandes oscilações de valores.

Figura 7: Mudança anual no comércio de gás natural canalizado e no fornecimento global de Gás Natural Líquido, 2019-2025.



Fonte: IEA (2025)

Embora tenha ocorrido uma interrupção do fluxo de gás canalizado russo pela Ucrânia em 1º de janeiro de 2025, esse fator não deve representar um risco

iminente a países da União Europeia, por exemplo, devendo apenas aumentar os requisitos de importação.

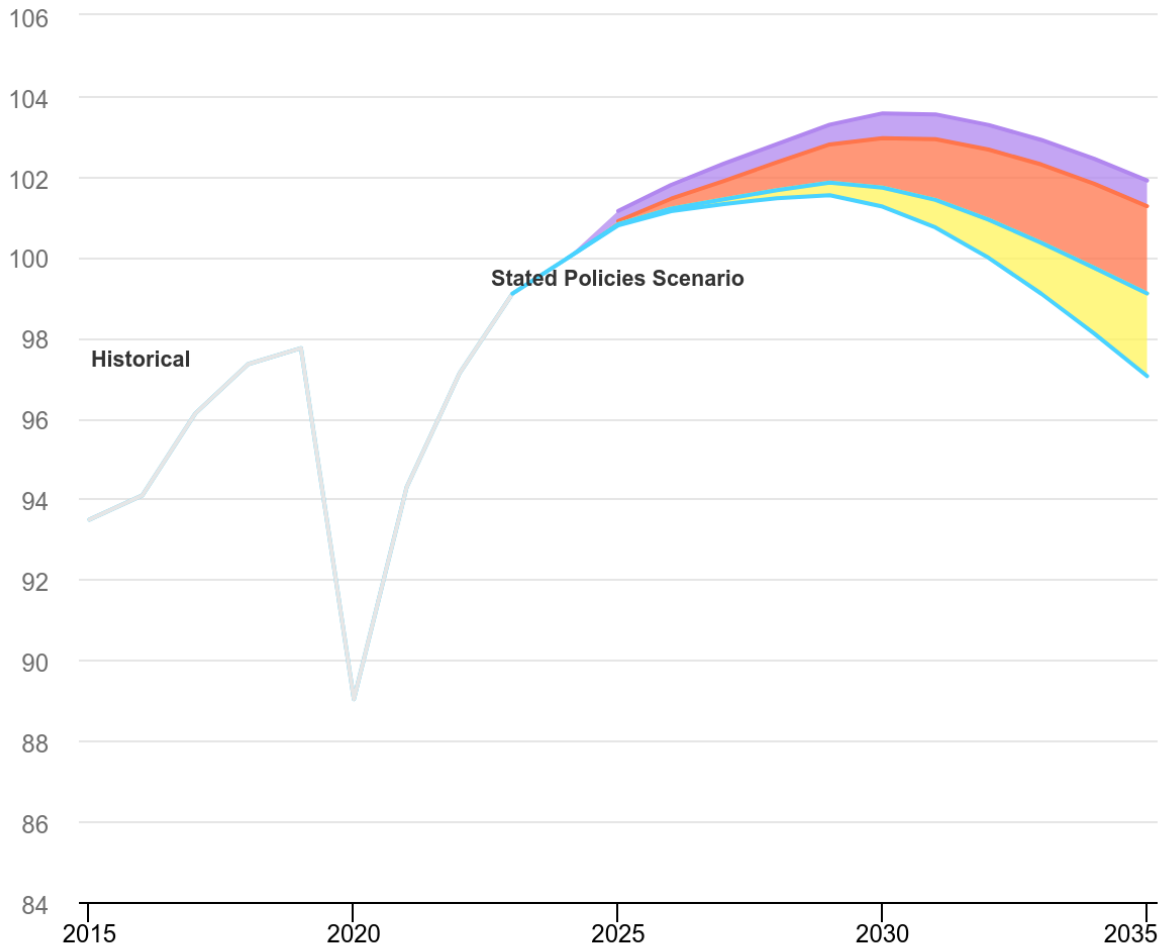
De acordo com a IEA (2024), com o cenário previamente discutido nesta pesquisa, a transição para a energia limpa tem avançado rapidamente nos últimos anos, sendo ela impulsionada por políticas governamentais e estratégias industriais. Porém, o cenário de curto prazo permanece incerto, especialmente devido às eleições de 2024 em países que representam metade da demanda global de energia. As questões energéticas e climáticas estão no centro do debate público, refletindo as preocupações com os altos preços de combustíveis e eletricidade, além dos impactos de eventos extremos, como inundações e ondas de calor.

Apesar da influência das políticas energéticas e das metas climáticas, elas não são as únicas impulsionadoras para o crescimento da energia limpa. Fatores econômicos, como, por exemplo, a redução de custos e a competição pela liderança no setor, também desempenham um papel fundamental. A energia limpa tem se consolidado como um motor de inovação, crescimento econômico e geração de empregos. Diante desse cenário dinâmico, o panorama energético global se torna cada vez mais complexo e com muitas nuances (IEA, 2024).

Conforme mencionado pela IEA (2024), os três principais cenários da atualidade frente os conflitos existentes são complementados por análises de sensibilidade que consideram fatores como energias renováveis, mobilidade elétrica, gás natural liquefeito, além de como ondas de calor, políticas de eficiência energética e o avanço da inteligência artificial podem influenciar a demanda por eletricidade.

De acordo com projeções da IEA (2024) quanto a demanda global de petróleo, de 2015 a 2035 serão observadas quedas em sua utilização. Ocorrendo maior aceitação e utilização de veículos elétricos (em amarelo) adoção e utilização mais lenta de veículos elétricos (em laranja), redução da conversão de petróleo em gás (em lilás) (Figura 8).

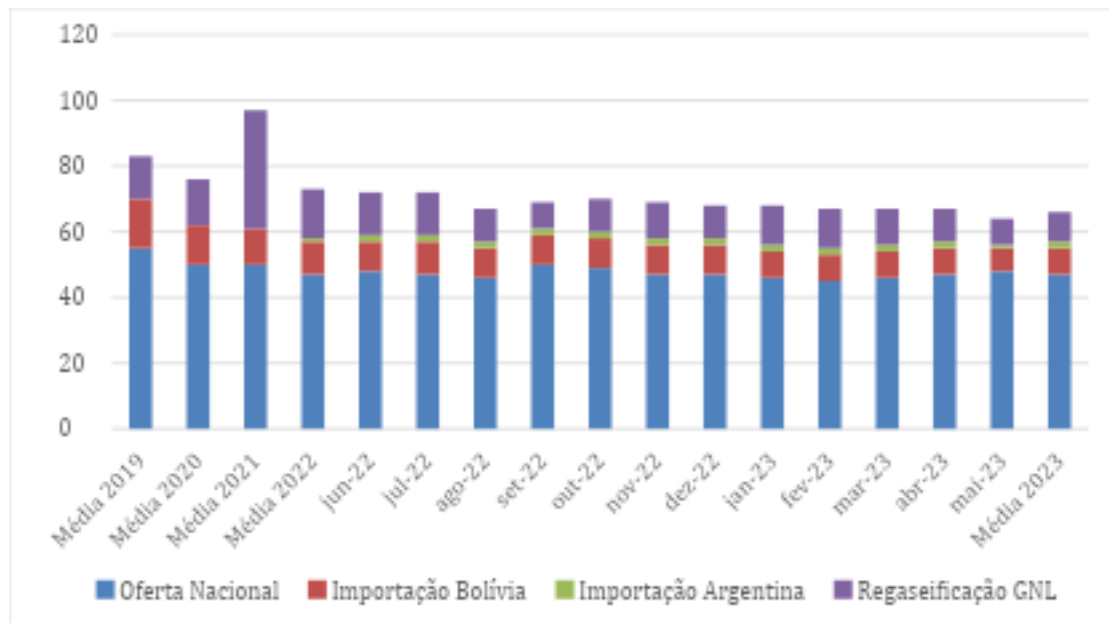
Figura 8: Projeções da IEA quanto a demanda global de petróleo, 2015-2035.



Fonte: IEA (2024)

Com o cenário geopolítico, a oferta de gás natural no Brasil em 2022 apresentou uma mudança significativa em relação a 2021. A produção nacional conseguiu aumentar, reduzindo sua dependência de importações. De acordo com o Balanço Energético Nacional (2023), a oferta interna de gás natural foi de 48,7 milhões de m³/dia, enquanto as importações diminuíram para 14,3 milhões de m³/dia em maio de 2023 (Figura 9). Ressalta-se que, a Bolívia permaneceu como o principal fornecedor externo de gás natural para o Brasil, mas sua participação nas importações totais acabou diminuindo. Outros fornecedores, como Estados Unidos, Trinidad e Tobago, Nigéria e Angola, também continuaram a exportar gás natural liquefeito para o Brasil.

Figura 9: Oferta Total de Gás Natural no Mercado Nacional



Fonte: Balanço Energético Nacional (2023)

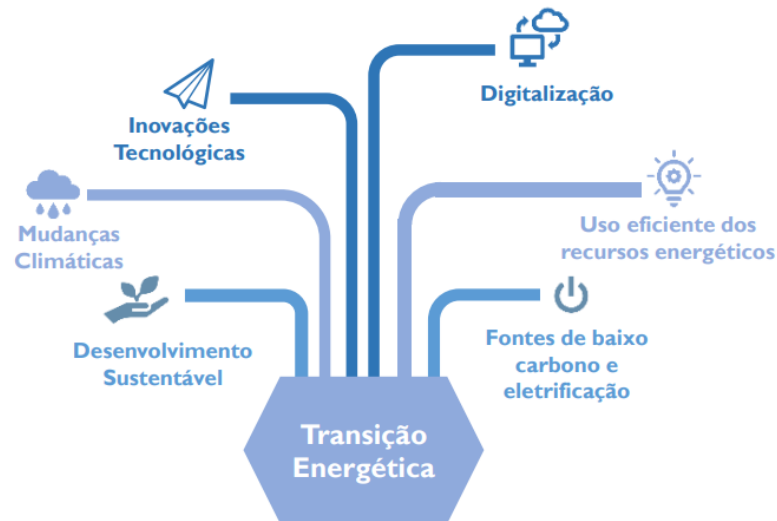
4.3 Segurança energética nacional e o papel estratégico do gás natural

O gás natural tem desempenhado um papel essencial como fonte de energia complementar no Brasil, suprimindo a demanda quando as fontes intermitentes não estão disponíveis. Além de ser um insumo estratégico para a indústria, sua relevância na segurança energética do país tem cada vez mais se fortalecido.

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE, 2024), a transição energética atual do Brasil, representa um movimento estratégico rumo a uma economia de baixo carbono, com foco na redução da pegada ambiental. Nesse cenário, há um forte incentivo à utilização mais eficiente dos recursos energéticos e à substituição progressiva de combustíveis com altas emissões de carbono por alternativas mais sustentáveis.

A matriz energética global vem passando por uma transformação, e no Brasil o processo não é diferente. Está se priorizando fontes de baixo carbono, como energias renováveis e o gás natural, que desempenha um papel crucial como combustível de transição. Além disso, a eletrificação de processos de conversão de energia tem se intensificado, impulsionando a descarbonização. Esse processo também está diretamente ligado ao avanço da automação e da digitalização de sistemas, que aprimoram o controle e a gestão energética (PNE, 2024) (Figura 10).

Figura 10: Bae da transição energética no Brasil

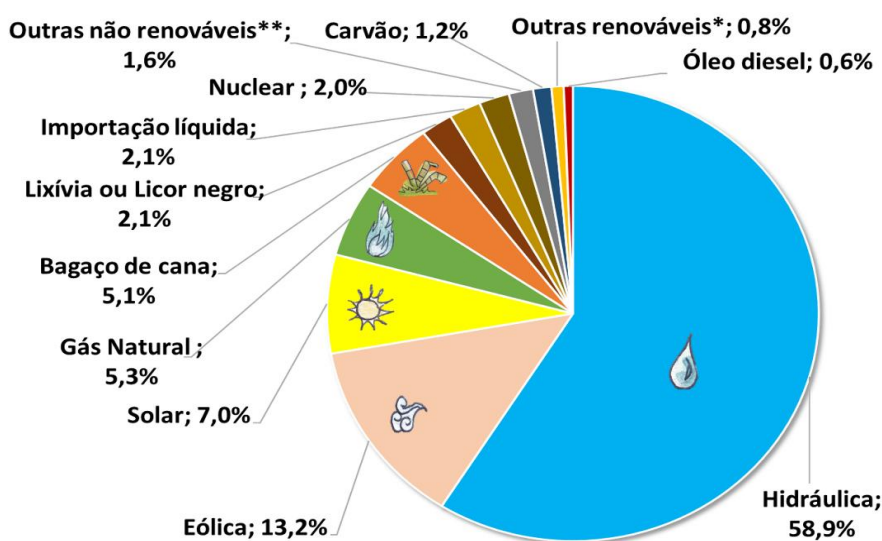


Fonte: PNE 2050 (2024)

A redução da participação da energia hidrelétrica na matriz elétrica e a crescente operação de usinas a fio d'água, caracterizadas por uma forte sazonalidade, aumentam a necessidade de fontes complementares para garantir o equilíbrio do sistema elétrico no Brasil (EPE, 2020).

Nesse contexto, o setor elétrico brasileiro tem recorrido ao gás natural para compensar a variabilidade da geração hídrica, especialmente diante de períodos prolongados de seca, garantindo maior estabilidade e confiabilidade no fornecimento de energia (EPE, 2020, p. 185). É importante destacar ainda, que a matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que energética. Isso se dá pelo fato da maior parte da energia gerada no país ser de usina hidrelétrica (Figura 11) (EPE, 2024).

Figura 11: Matriz Energética Nacional - 2023



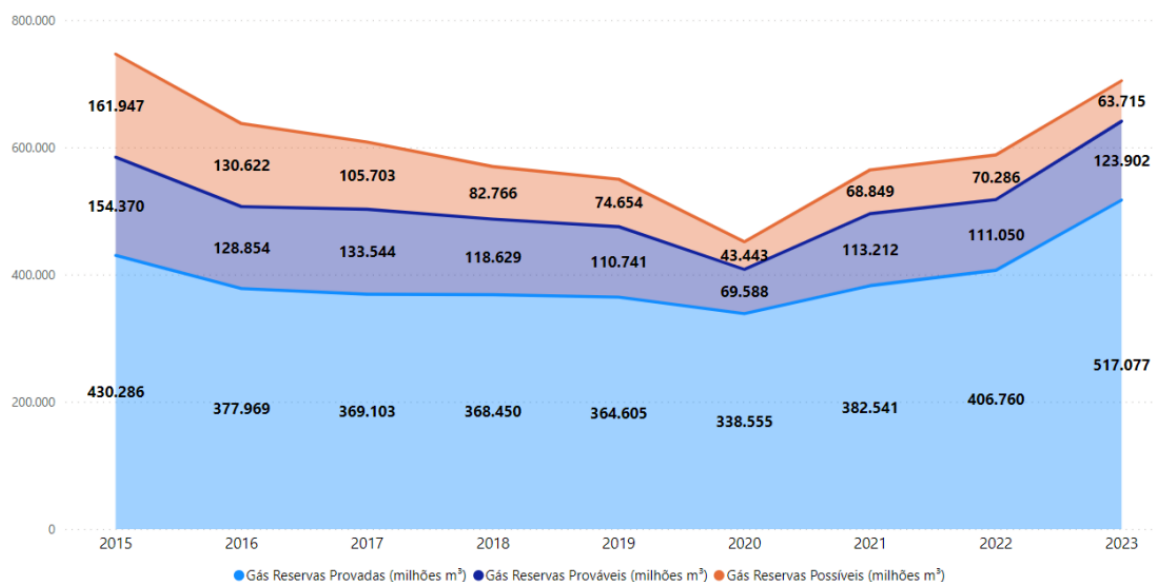
Fonte: EPE (2024)

A partir do cenário atual do Brasil, o Instituto E+ Transição Energética (2020), informa que o país parte de uma posição privilegiada na transição energética, por já possuir uma matriz elétrica predominantemente renovável, permitindo que avance diretamente para a modernização e ampliação de suas fontes sustentáveis, sem a necessidade de uma descarbonização intensiva. Além disso, a abundância de recursos energéticos no país elimina preocupações quanto ao suprimento da demanda crescente. Pelo contrário, a diversidade e a vasta disponibilidade de fontes, como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa, conferem ao Brasil uma vantagem estratégica. Esse potencial não apenas fortalece sua segurança energética, mas também posiciona o país como um líder natural na transição global para uma economia de baixo carbono, com capacidade para estabelecer seus próprios caminhos e influenciar o cenário energético internacional (E+, 2020; Santana, 2022).

Enfatizando o uso do gás natural, o mesmo vem ganhando espaço no cenário nacional. De acordo com o Boletim Anual de Recursos e Reservas (BAR) de 2023 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), as reservas provadas de gás natural no Brasil aumentaram significativamente em relação a 2022. As reservas provadas (1P) atingiram 517,1 bilhões de m³, o qual indica um crescimento de aproximadamente 27% em comparação ao ano anterior. As reservas provadas + prováveis (2P) foram de 641,0 bilhões de m³, e as reservas provadas +

prováveis + possíveis (3P) totalizaram 704,7 bilhões de m³. A evolução nas reservas de gás natural pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12: Evolução das Reservas (Provada, Provável e Possível) de Gás Natural (milhões m³)



Fonte: Boletim Anual de Recursos e Reservas (2023)

Este aumento nas reservas de gás natural é consequência dos avanços na exploração e desenvolvimento de campos, especialmente nas áreas do pré-sal, que têm se mostrado promissoras para a ampliação das reservas nacionais. Além disso, a Petrobras informou que suas estimativas de reservas provadas de óleo, condensado e gás natural, segundo critérios da *U.S. Securities and Exchange Commission* (SEC), totalizaram 10,9 bilhões de barris de óleo equivalente (boe) em dezembro de 2023 (IEA, 2024b).

Em 2021, o Brasil registrou um consumo médio de gás natural de 116 milhões de metros cúbicos por dia (m³/dia), representando um aumento de 22,3% em relação a 2020, quando o consumo médio foi de 95 milhões de m³/dia. Em 2022, o consumo médio total de gás natural apresentou uma diminuição de 24%, resultado redução acentuada de 62,6% do despacho de gás natural para as usinas termelétricas (ANP, 2024).

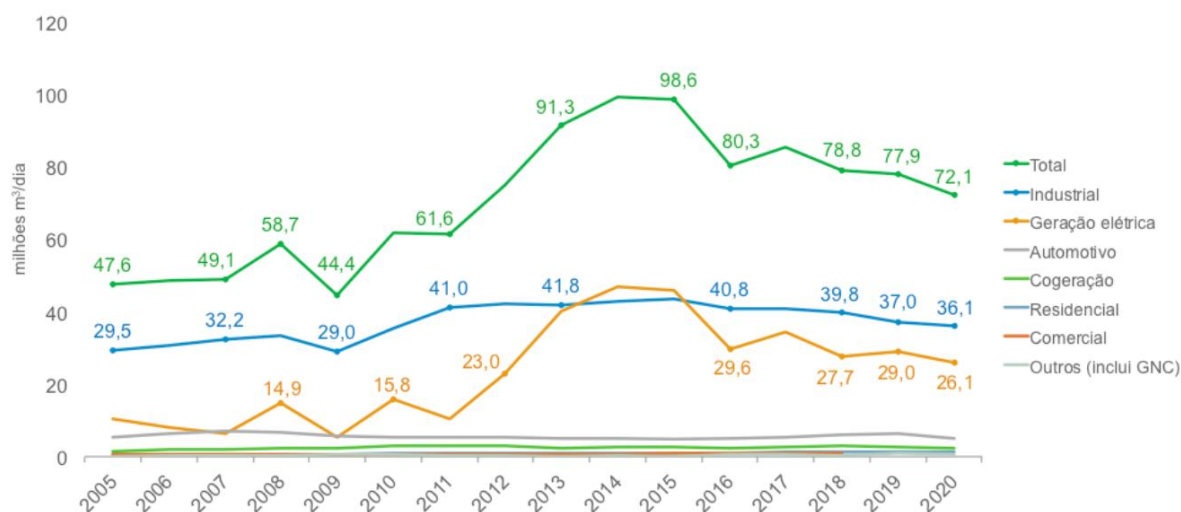
Para projeções futuras, o PNE 2050, prevê cenários de evolução do consumo de energia no longo prazo, incluindo o gás natural. Esses estudos consideram possíveis inovações e eventos que possam produzir mudanças significativas na sociedade e no seu relacionamento com a energia (PNE, 2024). Além

disso, a produção bruta de gás natural no Brasil tem apresentado melhoras e crescimento. Em janeiro de 2025, a produção atingiu 160,7 milhões de m³/dia, efetivando um aumento de 4,4% em relação ao mesmo período do ano anterior.

Sendo assim, os dados apresentados indicam que o Brasil possui potencial para aumentar o consumo de gás natural até 2050 sem aumentar a dependência externa, especialmente com o aproveitamento das reservas provenientes do pré-sal e de outras fontes nacionais.

Na Figura 13 é possível visualizar que a indústria responde historicamente pelo maior consumo no Brasil, de acordo com informações do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2024).

Figura 13: Consumo diário de gás natural no Brasil, por setor, entre 2005 e 2020



Fonte: BNDES (2024)

De acordo com o BNDES (2024), observa-se que a indústria tem sido historicamente o principal consumidor de gás natural no Brasil. Em 2019, o setor utilizou 37 milhões de m³/dia, representando 47% do consumo total, enquanto em 2020, o consumo foi de 36,1 milhões de m³/dia, equivalente a 50% do total.

Com a entrada em vigor do novo marco regulatório do gás natural, espera-se que a competitividade no mercado aumente, permitindo que o consumo industrial ultrapasse 70 milhões de m³/dia até 2030. Essa projeção considera tanto a reativação e expansão da produção nas indústrias já existentes quanto a substituição de outros insumos por gás natural, além da implantação de novas unidades industriais.

De acordo com o relatório “Gás para o Desenvolvimento: Perspectivas de Oferta e Demanda no Mercado de Gás Natural do Brasil”, projeta-se um acréscimo de 42 milhões de m³/dia no consumo. Desses, 29 milhões de m³/dia viriam de novos investimentos. Sendo eles, 18 milhões de m³/dia destinados a novas plantas industriais; e 11 milhões de m³/dia para novas termelétricas voltadas à autoprodução de energia. Além disso, uma oferta de gás natural na faixa de US\$ 4,00 a US\$ 6,00 por milhão de BTU (sem impostos) poderia gerar um consumo industrial adicional de 21,8 milhões de m³/dia.

A combinação do mercado interno robusto e a vantagem competitiva do país na produção de materiais acabam tornando o Brasil um destino atraente para grandes investimentos em indústrias intensivas em gás natural, que podem superar 35 bilhões de reais.

5. CONCLUSÃO

A análise da segurança energética no contexto da dependência de fontes intermitentes e dos fatores geopolíticos evidencia a importância e necessidade eminente do gás natural na transição energética a nível global e nacional. No cenário em que a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis tem aumentado cada vez mais, o gás natural surge como um ponto fundamental para a estabilidade e segurança da matriz energética, especialmente quando comparado a outros combustíveis fósseis.

Embora as fontes renováveis, como a energia solar e eólica discutidas nessa pesquisa, sejam essenciais para o futuro energético sustentável, elas acabam enfrentando desafios importantes quanto à sua variabilidade e imprevisibilidade, aspectos esses que podem comprometer a confiabilidade do fornecimento de energia em momentos críticos, como por exemplo em períodos de seca prolongada ou falta de vento. A integração dessas fontes intermitentes ao sistema energético exige soluções inteligentes e um tanto que complexas para mitigar esses riscos. Com isso, o gás natural se mostra como uma fonte complementar, por apresentar a capacidade de garantir a estabilidade da geração elétrica, especialmente nas fases de transição.

A crise geopolítica atual, intensificada pela guerra entre Rússia e Ucrânia, tem mostrado de forma clara e exemplificada, a vulnerabilidade dos mercados globais de energia às tensões políticas. Esse conflito acabou interrompendo cadeias de suprimento e gerando impactos econômicos a longo prazo. No entanto, o conflito também impulsionou a aceleração de investimentos em fontes renováveis e na adoção de tecnologias de baixo carbono, ocorrendo reflexões quanto a mudança no paradigma energético mundial.

No Brasil, o fortalecimento da produção de gás natural tem se mostrado uma estratégia eficaz para reduzir a dependência externa e consequentemente garantindo maior resiliência ao sistema elétrico nacional. Assim, o país tem se beneficiado da expansão de suas reservas de gás natural, especialmente no pré-sal, proporcionando oportunidades em assegurar um fornecimento interno estável e sustentável até 2050. Essa autossuficiência brasileira, associada a um mercado interno sólido e com vantagens competitivas no setor industrial, coloca o Brasil como um destino atrativo para investimentos em setores intensivos em gás natural.

Por outro lado, é importante destacar que a transição para um modelo energético mais sustentável não pode ser realizada de forma rápida ou não levando em consideração os desafios técnicos e geopolíticos que surgem com o decorrer do tempo. Uma dependência excessiva de fontes intermitentes sem uma consolidação de fontes de energia estáveis, como o gás natural, pode acarretar fragilidades significativas no fornecimento de energia, o que afetaria diretamente o desenvolvimento econômico e social do país.

Assim, é fundamental que haja uma adoção de políticas energéticas equilibradas, que priorizem as peculiaridades da matriz energética, a integração de fontes renováveis e a utilização do gás natural como fonte de transição, é fundamental para garantir que países, especialmente os emergentes como o Brasil, possam atingir suas metas de sustentabilidade sem que haja comprometimento a suas seguranças energéticas.

Portanto, a vulnerabilidade das fontes intermitentes e os desafios geopolíticos recentes reforçam a necessidade urgente de estratégias que priorizem a segurança energética. No caso do Brasil, o gás natural não apenas assegura a confiabilidade do sistema elétrico, mas também acaba desempenhando um papel fundamental na captação de investimentos e na promoção de um crescimento econômico sustentável. O país está em uma posição privilegiada para explorar seu potencial energético interno de forma estratégica, equilibrando segurança, sustentabilidade e desenvolvimento econômico, e, assim, se consolidando cada vez mais como um líder regional na transição energética.

A implementação de políticas públicas que apoiem essa transição, incluindo o incentivo à inovação tecnológica e a criação de um ambiente favorável ao investimento em gás natural, será fundamental para que o Brasil aproveite em todos os níveis as oportunidades que aparecem quanto ao cenário energético global.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Júlio C. de. **O processo do Gás Natural**. Portal Gás Brasil, Seção Artigos Técnicos, 2000. Disponível em: www.gasbrasil.com.br/tecnicas/artigos

ANG, Beng Wah; CHOONG, Wei Lim; NG, Tsan Sheng. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 42, p. 1077-1093, 2015.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2023**. 270p., 2024

BARBOSA, Luciana Pereira; MOURA, Lyzette Gonçalves Moraes; BARROS FILHO, Allan Kardec Duailibe. Avaliação da expansão do gás natural como ponte para a transição energética no Brasil. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 11, n. 1, p. 1-11, 2024.

BELTRÁN-TELLES, Aurelio et al. Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. **CienciaUAT**, v. 11, n. 2, p. 105-117, 2017.

BLASQUES, Luis Carlos Macedo; DE AZEVEDO, Thiago Silva; PINHO, João Tavares. Sistemas individuais de geração com fontes intermitentes (sigfi) dos tipos solar fotovoltaico e eólico: análise de viabilidade técnico-econômica considerando a resolução ANEEL No 83/2004. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, n. 1, 2011.

BLUM, Helcio; LEGEY, Luiz FL. The challenging economics of energy security: Ensuring energy benefits in support to sustainable development. **Energy Economics**, v. 34, n. 6, p. 1982-1989, 2012.

BUSSON, Bruna de Oliveira et al. Validação de modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o semiárido brasileiro. 2018.

CANTON, Helen. International energy agency—IEA. In: **The Europa Directory of International Organizations 2021**. Routledge, p. 684-686, 2021.

CHERP, Aleh; JEWELL, Jessica. The concept of energy security: Beyond the four As. **Energy policy**, v. 75, p. 415-421, 2014.

CHESTER, Lynne. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. **Energy policy**, v. 38, n. 2, p. 887-895, 2010.

COSTA JUNIOR, Carlos Vital Pinto et al. Energetic and exergetic analysis of an off-grid photovoltaic system located in São Luís-MA. **Brazilian Journal of Development**, p. 58231-58257, 2022.

COSTA, Denis Carlos Lima et al. A utilização do gás natural como transição estável da matriz energética. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 3, p. e3406-e3406, 2024.

DANNREUTHER, Roland. **Energy security**. John Wiley & Sons, 2017.

DE SOUSA, Eduardo Caetano. O Gás Natural nos Confrontos da Geopolítica Global. **Nação e Defesa**, n. 153, p. 101-123, 2019.

DEBASTIANI, Luiz Henrique; CANZI, Idir. Governança socioambiental na China: balanços e perspectivas para o 14º Plano Quinquenal. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, v. 13, n. 2, 2023.

E+ Transição Energética. **Transição Energética no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://emaisenergia.org/publicacao/transicao-energetica-no-brasil>

ENGERER, Nicholas A.; MILLS, F. P. KPV: A clear-sky index for photovoltaics. **Solar energy**, v. 105, p. 679-693, 2014.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

FELDMANN, Darlei; DE OLIVEIRA, Ricardo Vasques; TESSARO, Heitor José. Controle Inercial e de Frequência Baseado em Gerador Síncrono Virtual Aplicado à Geração Fotovoltaica de Grande Porte. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.

FREIRE, Vinícius dos Santos. **Análise da complementaridade da geração eólico-solar de uma usina de geração híbrida no litoral cearense**. 2024. 97 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

FUENTES, Sergio et al. Transition to a greener Power Sector: Four different scopes on energy security. **Renewable Energy Focus**, v. 33, p. 23-36, 2020.

GHASEMIAN, Mehran; SHEIKHOESLAMI, M.; DEHGHAN, Maziar. Performance improvement of photovoltaic/thermal systems by using twisted tapes in the coolant tubes with different cross-section patterns. **Energy**, v. 279, p. 128016, 2023.

GIACOBBO, Daniela Garcia. **Segurança e Transição Energética: Tomo III**. Synergia, 2024.

GIUPPONI, Carlo; BISCARO, Claudio. Vulnerabilities—bibliometric analysis and literature review of evolving concepts. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 123002, 2015.

GUIX, Pau Ruiz. The energy trilemma once more: new relations between accelerating decarbonization, ensuring energy security and promoting economic development in a new era of geopolitical and geoeconomic competition. **Cuadernos Económicos de ICE**, n. 107, 2024.

GÜRSAN, Cem; DE GOOYERT, Vincent. The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition?. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, p. 110552, 2021.

HALLACK, Michelle et al. O Tempo do mundo da segurança, integração e transição energética justa. **Revista Tempo do Mundo**, n. 32, p. 5-17, 2023.

HATIPOGLU, Emre; CONSIDINE, Jennifer; ALDAYEL, Abdullah. Unintended transnational effects of sanctions: A global vector autoregression simulation. **Defence and Peace Economics**, v. 34, n. 7, p. 863-879, 2023.

HENDERSON, Michael I.; NOVOSEL, Damir; CROW, Mariesa L. Electric power grid modernization trends, challenges, and opportunities. In: **IEEE**, Nov. 2017.

HOFF, Thomas E.; PEREZ, Richard. Quantifying PV power output variability. **Solar Energy**, v. 84, n. 10, p. 1782-1793, 2010.

HOLTTINEN, Hannele et al. **Design and operation of energy systems with large amounts of variable generation**: Final summary report, IEA Wind TCP Task 25. 2021.

HOSSEINI, Seyed Ehsan. Transition away from fossil fuels toward renewables: Lessons from Russia-Ukraine crisis. **Future Energy**, v. 1, n. 1, p. 2-5, 2022.

IEA – International Energy Agency. **Electricity Information**. 2024b. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information>

IEA – International Energy Agency. **Executive summary – Gas Market Report, Q1 – 2025**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2025/executive-summary>

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook 2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook 2024**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

IYKE, Bernard Njindan. Climate change, energy security risk, and clean energy investment. **Energy Economics**, v. 129, p. 107225, 2024.

JEWELL, Jessica. **The IEA model of short-term energy security (MOSES)**: primary energy sources and secondary fuels. 2011. Disponível em: https://www.iea.org/media/freepublications/2011/moses_paper.pdf

JURINIC, Francesco et al. Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas: Através de um sistema de resfriamento. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 51-64, 2022.

KHARRAZI, Ali et al. Examining the resilience of national energy systems: Measurements of diversity in production-based and consumption-based electricity in the globalization of trade networks. **Energy Policy**, v. 87, p. 455-464, 2015.

KIRIYAMA, Eriko; KAJIKAWA, Yuya. A multilayered analysis of energy security research and the energy supply process. **Applied Energy**, v. 123, p. 415-423, 2014.

LE COQ, Chloe; PALTSEVA, Elena. Measuring the security of external energy supply in the European Union. **Energy policy**, v. 37, n. 11, p. 4474-4481, 2009.

LEÃO, Rodrigo Pimentel Ferreira et al. A geopolítica do petróleo e do gás natural no contexto da transição energética: um processo de transição justa? **Texto para Discussão**. Inep, ano 4, n. 30, jun. 2021

LEE, Chien-Chiang; XING, Wenwu; LEE, Chi-Chuan. The impact of energy security on income inequality: The key role of economic development. **Energy**, v. 248, p. 123564, 2022.

LEÓN, González-De; SCIPIO-CIMETTA, Sabrina Di. The role of natural gas in today's energy transition. **Dyna**, v. 89, n. 221, p. 92-100, 2022.

LIMA, José Wanderley Maragon; ALVES, Lincoln Muniz; MARENGO, José Antonio. Panorama energético devido às mudanças climáticas: propostas de adaptação do setor elétrico brasileiro à crise climática global. **Relatório Técnico**, Instituto de Energia e Meio Ambiente 42p., 2023

LOPES, Sulamita Carolina. **Impacto na estabilidade do sistema elétrico causado pela intermitência da geração eólica**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2022.

LOSZ, Akos; ELKIND, Jonathan. The role of natural gas in the energy transition. **Center on Global Energy Policy, Columbia University, New York**, 2019.

MELLO, João Carlos de Oliveira et al. Desafios da transição energética: soluções e lições aprendidas em um mercado com energia intermitente. **O Setor Elétrico**. Conteúdo Técnico, 2025.

MIELNICZUK, Fabiano. Rússia e Ucrânia: a guerra que "não pode ser vencida". **Conjuntura Austral**, v. 13, n. 64, p. 7-15, 2022.

MILLS, Andrew. **Understanding variability and uncertainty of photovoltaics for integration with the electric power system**. 2009.

MIŠÍK, Matúš; NOSKO, Andrej. Post-pandemic lessons for EU energy and climate policy after the Russian invasion of Ukraine: Introduction to a special issue on EU green recovery in the post-Covid-19 period. **Energy Policy**, v. 177, p. 113546, 2023.

MIT Energy. **Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables**. 2012.

MOHAMMED, Sadah et al. A systematic review: The role of emerging carbon capture and conversion technologies for energy transition to clean hydrogen. **Journal of Cleaner Production**, p. 141506, 2024.

MOREIRA, Hugo Lima; DE MIRANDA PINHEIRO, Carlos Alberto; DE SENA, Edilan Silva. Análise comparativa da viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos e eólicos para microgeração. **LUMEN ET VIRTUS**, v. 15, n. 40, p. 4513-4529, 2024.

NASCIMENTO, Regina Célia Macêdo do. **Vulnerabilidade ambiental em estuários tropicais: ferramentas e modelo conceitual para gestão**. 2024 – 172p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, São Carlos, 2024.

NGUYEN, Huan Huu; VAN NGUYEN, Phuc; NGO, Vu Minh. Energy security and the shift to renewable resources: The case of Russia-Ukraine war. **The Extractive Industries and Society**, v. 17, p. 101442, 2024.

PASTOR, João Cesar Silva; MACÊDO, Ana Vitória de Almeida. Panorama atual e perspectivas futuras das fontes de energia renováveis intermitentes no nordeste brasileiro. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2020.

PEREZ-ARRIAGA, Ignacio J.; BATLLE, Carlos. Impacts of intermittent renewables on electricity generation system operation. **Economics of Energy & Environmental Policy**, v. 1, n. 2, p. 3-18, 2012.

PICOLLI, Daniel. **Déficit de inércia síncrona: um estudo de sistemas elétricos de potência com alta penetração de energias renováveis**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Santa Catarina, 2021.

PMO - Programa Mensal de Operação Energética. **Relatório Executivo do Programa Mensal de Operação**. Março, 2025

RABBI, Mohammad Fazle et al. Energy security and energy transition to achieve carbon neutrality. **Energies**, v. 15, n. 21, p. 8126, 2022.

REYNOLDS, Matthew; CUTSOR, Jackson; ERICKSON, Larry E. Electrical Grid Modernization. In: **Solar Powered Charging Infrastructure for Electric Vehicles**. CRC Press, 2016. p. 75-84.

RIZETTI, Gabriela. **Análise da estabilidade de sistemas elétricos com geração solar centralizada e distribuída representadas por modelos WECC**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.

RODRIGUES, Marcus Vinícius Sousa; AQUINO, Marisete Dantas de; THOMAZ, Antônio Clécio Fontelles. Análise da eficiência na produção de energia eólica nos principais estados brasileiros produtores, por meio da aplicação de análise por envoltória de dados. **Rev. Tecnol.** Fortaleza, v. 36, n. 1 e 2, p. 18-33, dez. 2015.

RÖLLER, Lars-Hendrik; DELGADO, Juan; FRIEDERISZICK, Hans W. **Energy: choices for Europe**. Brussels: Bruegel, 2007.

RUIZ, Jorge Mario Avella et al. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA AMBIENTAL DE UM SISTEMA HÍBRIDO SOLAR FOTOVOLTAICO: EÓLICO. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2016. p. 1-6.

SANTANA, Jéssica Carvalho de. **O papel do gás natural na diversificação e segurança da matriz elétrica brasileira (2015 – 2030)**. 2022. 55 f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) - Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

SAVA, Paulo Roberto. **Transmissão**: desafios de interligação de fontes renováveis intermitentes. 2017. 152 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Energias Renováveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SAYED, Enas Taha et al. Renewable energy and energy storage systems. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1415, 2023.

SILVA, Lucas de Azevdo et al. Análise de viabilidade econômica para a implantação de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica e eólica para o abastecimento do município de Janaúba-MG e região. **REPAE-Revista de Ensino e Pesquisa em Administração e Engenharia**, v. 10, n. 1, p. 48-76, 2024.

STENT, Angela. Germany and Russia: Farewell to Ostpolitik?. **Survival**, v. 64, n. 5, p. 27-38, 2022.

SULLIVAN, Becky; NORTHAM, Jackie. **How Europe's reliance on Russia's gas plays into the war in Ukraine**. Disponível em: <https://www.npr.org/2022/02/09/1079338002/russia-ukraine-europe-gas-nordstream2-energy>

TEIXEIRA, Cássio Adriano Nunes et al. Gás natural – um combustível chave para uma economia de baixo carbono. **BNDES**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 131-175, 2021.

THALASSINOS, Eleftherios et al. Managerial issues regarding the role of natural gas in the transition of energy and the impact of natural gas consumption on the GDP of selected countries. **Resources**, v. 11, n. 5, p. 42, 2022.

THANH, To Trung et al. Impacts of digitalization on energy security: evidence from European countries. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 10, p. 11599-11644, 2023.

TRIGUERO-RUIZ, Francisco; AVILA-CANO, Antonio; ARANDA, Francisco Trujillo. Measuring the diversification of energy sources: The energy mix. **Renewable Energy**, v. 216, p. 119096, 2023.

UMLAND, Andreas. Germany's Russia policy in light of the Ukraine conflict: Interdependence theory and Ostpolitik. **Orbis**, v. 66, n. 1, p. 78-94, 2022.

VAN DER LINDEN, Nico H. et al. **Review of international experience with renewable energy obligation support mechanisms**. Petten: ECN, 2005.

VILLAMIZAR, Yeny Andrea Niño; PLATA, Manuel Enrique Nieves; JIMÉNEZ, César Augusto Cortés. Desafíos de la transición energética sostenible: perspectivas para la investigación y la gestión. **Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión**, v. 31, n. 2, p. 137-158, 2023.

XIAO, Renrong et al. Liquefied natural gas trade network changes and its mechanism in the context of the Russia–Ukraine conflict. **Journal of Transport Geography**, v. 123, p. 104101, 2025.

ZHOU, Qian et al. A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system. **Energy**, v. 188, p. 115993, 2019.

ŻUK, Piotr. The war in Ukraine: Consequences for the economy, labour class and equitable development in Europe and beyond. **The economic and labour relations review**, v. 34, n. 2, p. 343-356, 2023.

ŻUK, Piotr; ŻUK, Paweł. National energy security or acceleration of transition? Energy policy after the war in Ukraine. **Joule**, v. 6, n. 4, p. 709-712, 2022.

ZWIRTES, Jossias; WANDERLEY, Augusto César Fialho. Desempenho de sistema fotovoltaico/térmico (pv/t) conectado a rastreador solar de dois eixos (DAST). In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2022. p. 1-10.