

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá**

**LUCAS RIGOLETTO GUEDES DE MORAIS**

**SEGURANÇA ELÉTRICA NO BRASIL:**  
A Relevância das Usinas Termelétricas na Estabilidade do Sistema Interligado  
Nacional

Guaratinguetá  
2025



**LUCAS RIGOLETTO GUEDES DE MORAIS**

**SEGURANÇA ELÉTRICA NO BRASIL:**

A Relevância das Usinas Termelétricas na Estabilidade do Sistema Interligado  
Nacional

Trabalho de Graduação de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez

Guaratinguetá

2025

M828s	<p>Morais, Lucas Rigoletto Guedes de Segurança elétrica no Brasil: a relevância das usinas termelétricas na estabilidade do sistema interligado nacional / Lucas Rigoletto Guedes de Moraes - Guaratinguetá, 2025. 66 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 63-66</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez</p> <p>1. Usinas termelétricas. 2. Produção de energia elétrica. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Energia - Fontes alternativas. I. Título.</p> <p>CDU 621.311.23</p>
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

**Lucas Rigoletto Guedes de Moraes**


**SEGURANÇA ELÉTRICA NO BRASIL:**

**A Relevância das Usinas Termelétricas na Estabilidade do Sistema Interligado Nacional**


Trabalho de Graduação de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia Mecânica.  
Área de Concentração:

Data da defesa: 17 / 11 / 2025


Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**NESTOR PROENZA PEREZ**  
Data: 24/11/2025 16:59:59-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez  
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

 Documento assinado digitalmente  
**THIAGO AVERALDO BIMESTRE**  
Data: 24/11/2025 16:27:59-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Averaldo Bimestre  
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

 Documento assinado digitalmente  
**JOSE CARLOS DE ANDRADE**  
Data: 19/11/2025 19:25:08-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Eng. José Carlos de Andrade  
UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

Dedico este trabalho à ...

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de iniciar expressando minha profunda gratidão aos meus pais, Carlos e Andréa, que sempre foram a base da minha formação pessoal e acadêmica. Foram eles que me ensinaram o valor da dedicação, do esforço e da persistência na busca pelos meus objetivos. Sem o apoio, o amor e os ensinamentos deles, a realização do sonho de me tornar engenheiro Mecânico não seria possível.

Estendo meus agradecimentos a toda a minha família, que sempre comemorou cada conquista ao meu lado, compartilhando alegria, incentivo e apoio em todos os momentos.

Agradeço também à minha namorada, Giovana, pelo incansável companheirismo, pela paciência admirável e pelo incentivo constante durante o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio constante foi essencial para que eu concluísse esta etapa com êxito, dedicação e excelência.

Registro ainda minha gratidão à República 6 de Paus, pela amizade e parceria de todos os moradores. O convívio com todos os moradores tornou minha jornada universitária inesquecível, que com certeza lembrarei durante toda a minha vida todos os momentos que passamos juntos.

Por fim, agradeço à Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá e a todos os professores que contribuíram para minha formação. Cada aula, orientação e conselho foram essenciais para o meu crescimento pessoal e profissional, culminando na concretização do sonho de me formar em Engenharia Mecânica.

“As universidades serão o que são suas bibliotecas”

(Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

## RESUMO

As usinas termelétricas possuem um forte papel na segurança elétrica do Sistema Interligado Nacional, considerando o contexto da transição elétrica brasileira e a crescente participação de fontes renováveis não despacháveis. Logo, o objetivo foi compreender de que forma as termelétricas contribuem para a estabilidade e confiabilidade do sistema, analisando diante da redução da capacidade de armazenamento hídrico e da intermitência das fontes solar e eólica. A metodologia adotada foi uma revisão bibliográfica, apoiada na análise SWOT para identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças do setor termelétrico. Os resultados evidenciam que as termelétricas são essenciais para a segurança elétrica nacional, atuando como fontes flexíveis e despacháveis que asseguram a continuidade do fornecimento em cenários de escassez hídrica ou baixa geração de fontes de geração não despacháveis. Contudo, identificou-se um parque termelétrico predominantemente obsoleto e dependente de combustíveis fósseis, o que impõe desafios ambientais e econômicos. Portanto, conclui-se que a modernização do setor, com foco em tecnologias de gás natural, biomassa e energia nuclear, é fundamental para garantir uma transição elétrica sustentável, segura e alinhada aos compromissos de descarbonização.

**Palavras-chave:** usinas termelétricas; segurança elétrica; transição elétrica; sustentabilidade.

## ABSTRACT

Thermoelectric power plants play a strong role in the electrical security of the National Interconnected System (SIN), considering the context of Brazil's energy transition and the growing participation of non-dispatchable renewable sources. Therefore, the objective was to understand how thermoelectric plants contribute to the system's stability and reliability, analyzing the reduction in hydropower storage capacity and the intermittency of solar and wind sources. The adopted methodology was a bibliographic review supported by a SWOT analysis to identify the strengths, weaknesses, opportunities, and threats of the thermoelectric sector. The results show that thermoelectric plants are essential for national electrical security, acting as flexible and dispatchable sources that ensure the continuity of supply in scenarios of water scarcity or low generation from non-dispatchable sources. However, the study identified a predominantly obsolete thermoelectric park dependent on fossil fuels, which imposes environmental and economic challenges. Therefore, it is concluded that the modernization of the sector, focusing on natural gas, biomass, and nuclear energy technologies, is essential to ensure a sustainable and secure energy transition aligned with decarbonization commitments.

**Keywords:** thermoelectric power plants; electrical security; energy transition;. sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira em 2024 e 2034 .....	13
Figura 2: Gráfico de Meses de reserva de energia desde 1996 até 2017 .....	15
Figura 3: Dados compilados de artigos sobre: "thermoelectric", "flexibility" e "power generation" .....	18
Figura 4: Produção anual de artigos relacionados a: "thermoelectric", "flexibility" e "power generation" .....	19
Figura 5: Países com pesquisas relacionadas a "thermoelectric", "flexibility" e "power generation" .....	20
Figura 6: Evolução da Capacidade Instalada no Brasil .....	23
Figura 7: Participação da Energia Renovável na Matriz Elétrica Brasileira .....	24
Figura 8: Estrutura Organizacional Sistema Elétrico Brasileiro .....	25
Figura 9: Distribuição do potencial hidrelétrico (UHEs) do PNE 2050 por região hidrográfica.....	28
Figura 10: Potencial eólico estimado e distribuição dos parques eólicos no Brasil ...	30
Figura 11: Evolução da capacidade instalada de Energia Eólica no Brasil .....	31
Figura 12: Geração Média de Energia Eólica Separada por Estados .....	32
Figura 13: Mapa da Irradiação Solar no Brasil .....	33
Figura 14: Variação da Irradiação Global nos meses.....	34
Figura 15: Reservas de Gás Natural no Mundo .....	36
Figura 16: Consumo Interno Gás Natural.....	36
Figura 17: Gasodutos existentes no Brasil.....	37
Figura 18: Net Primary Production Brasil .....	39
Figura 19: Esquema de Turbina a Gás .....	41
Figura 20: Esquema de Motor de Combustão Interna.....	42
Figura 21: Esquema de Usina Térmica de Carvão.....	43
Figura 22: Esquemático de uma Usina Nuclear .....	44
Figura 23: Gráfico com número de Termelétricas no Brasil .....	45
Figura 24: Gráfico das termelétricas de biomassa .....	46
Figura 25: Gráfico das termelétricas de combustível fóssil .....	47
Figura 26: Taxa de emissão de CO2 de combustíveis fósseis.....	51
Figura 27: Análise SWOT para Usinas Termelétricas .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial hidrelétrico brasileiro para os estudos de longo prazo.....	27
Tabela 2: Custo para Implantação de Usinas de Energia .....	48
Tabela 3: Custo do Combustível em Usinas Termelétricas.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIN	Sistema Interligado Brasileiro
FRND	Fontes Renováveis Não Despacháveis
ONS	Operador Nacional do Sistema
CNAEE	Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
GPCS	Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
APE	Autoprodução de Energia
GD	Geração Distribuída
UHEs	Usinas Hidrelétricas
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
O&M	Operação e Manutenção
CVU	Custo Variável Unitário

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL .....	16
1.2.1 Objetivos específicos:.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: ESTRUTURA ORGANIZACIONAL, HISTÓRICO, SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	22
2.1.1 Histórico da matriz Elétrica Brasileira .....	22
2.1.2 Estrutura organizacional sistema elétrico brasileiro .....	24
2.1.3 Cenário atual das fontes renováveis presentes na matriz elétrica .....	27
2.2 USINAS TERMELÉTRICAS .....	35
2.2.1 Principais fontes energéticas de usinas termelétricas no Brasil .....	35
2.2.2 Tecnologias de Conversão Energética em Usinas Termelétricas .....	40
2.2.3 Capacidade instalada e geração de energia pelas termelétricas no Brasil .....	45
2.3 IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DAS USINAS TERMELÉTRICAS .....	47
2.3.1 Comparação de custos construção, operação e manutenção de diferentes fontes de energia .....	48
2.3.2 Emissões de gases de efeito estufa em usinas termelétricas .....	50
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>52</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>54</b>
4.1 COMO O BRASIL PODE ENFRENTAR OS DESAFIOS DA TRANSIÇÃO ELÉTRICA.....	54
4.1.1 Contribuição das Termelétricas para a Segurança Elétrica do Brasil.....	54
4.1.2 O Papel Crucial das Termelétricas em Cenários de Escassez Hídrica .....	55
4.1.3 As usinas termelétricas podem atuar como alternativas sustentáveis para geração de energia elétrica .....	56
4.2 ANÁLISE ESTRATÉGICA (SWOT) DAS USINAS TERMELÉTRICAS .....	57
4.2.1 Apresentação dos pontos discutidos na Matriz SWOT.....	57
4.2.2 Síntese dos resultados da matriz SWOT.....	59

4.3 O DESEQUILÍBRIO DO PARQUE TERMELÉTRICO ATUAL E DIREÇÕES FUTURAS .....	59
4.3.1 Diagnóstico da Matriz Termelétrica: A Dominância de combustíveis fósseis ...	59
4.3.2 Direcionamentos Estratégicos e Perspectivas Futuras .....	60
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1. INTRODUÇÃO

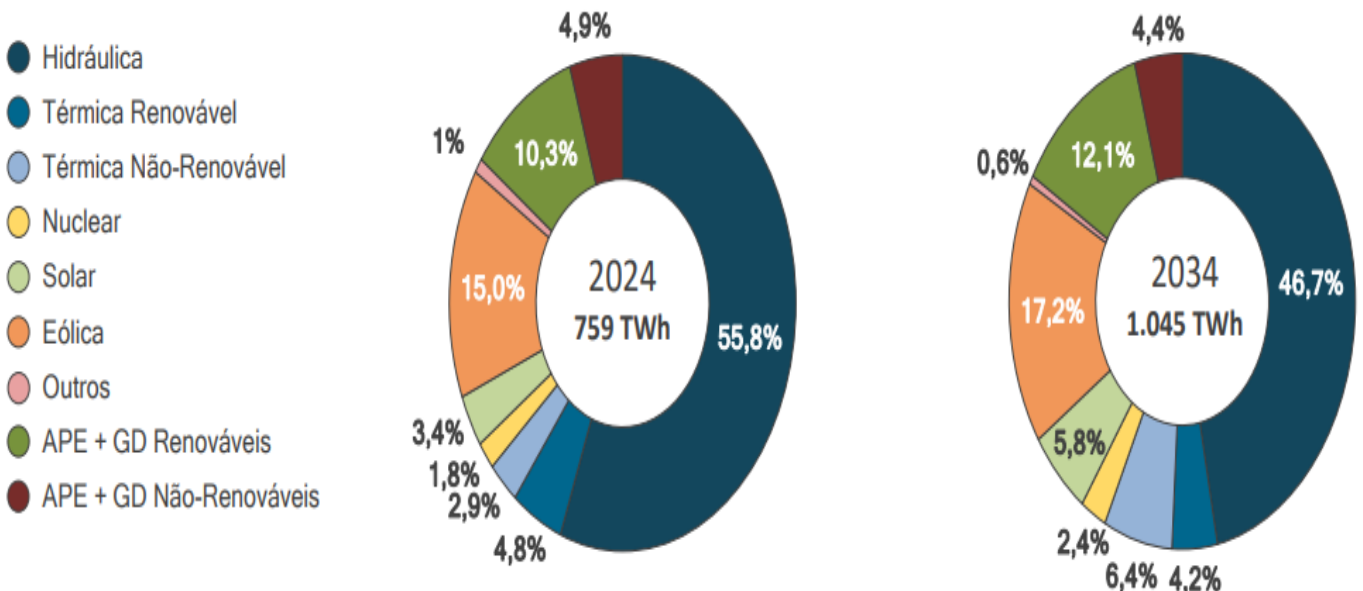
### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

O Brasil é um país que pode ser considerado referência no contexto mundial de geração de energia, pois tem uma capacidade de geração elétrica majoritariamente renovável, tendo como sua principal fonte de energia a hidroeletricidade (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

Segundo o Balanço energético nacional 2024, a matriz elétrica brasileira é altamente diversificada, e entre as fontes renováveis, destaca-se a fonte hidráulica com 55,8% de participação, 15% Eólica, 10,3% Autoprodução de energia e Geração Distribuída Renovável, 4,8% Térmicas Renováveis e 3,4% de Energia Solar (EPE, 2024).

Além disso, é possível perceber um crescimento da participação da autoprodução e geração distribuída de fontes renováveis ao longo dos últimos anos e, dessa maneira, estima-se que o Brasil chegue a 86% de renovabilidade em 2034, segundo estimativas realizadas pela Empresa de Pesquisas Energéticas, como pode ser conferido na figura 1. (EPE, 2024)

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira em 2024 e 2034



Fonte: EPE (2024)

Segundo a figura 1, espera-se um crescimento estimado de 286 TWh para os próximos 10 anos, sendo que a energia hidráulica terá uma redução em sua representação na matriz elétrica, ao passo que, eólicas e solar (Incluindo

Autoprodução e Geração Distribuída Renováveis) terão um aumento expressivo no Sistema Interligado Brasileiro (EPE, 2024).

Contudo, para manter o Sistema Interligado Nacional (SIN) em destaque no contexto mundial de energia, por conta de sua renovabilidade, é necessário que ele esteja em constante modernização e aproveitando da abundância de recursos naturais renováveis que estão presentes no território brasileiro. (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

Dessa maneira, para ampliar a potência elétrica no sistema elétrico brasileiro e manter a sustentabilidade, foi necessário que nas últimas décadas fossem incorporadas novas fontes renováveis não despacháveis (FRND). Essas fontes possuem a característica de não poderem ser acionadas a qualquer momento, já que sua geração depende da disponibilidade dos recursos naturais no instante em que a energia é produzida. Nesse contexto, as principais FRND recentemente adicionadas à expansão da capacidade do Sistema Interligado Nacional foram as hidrelétricas a fio d'água, a energia eólica e a energia solar (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

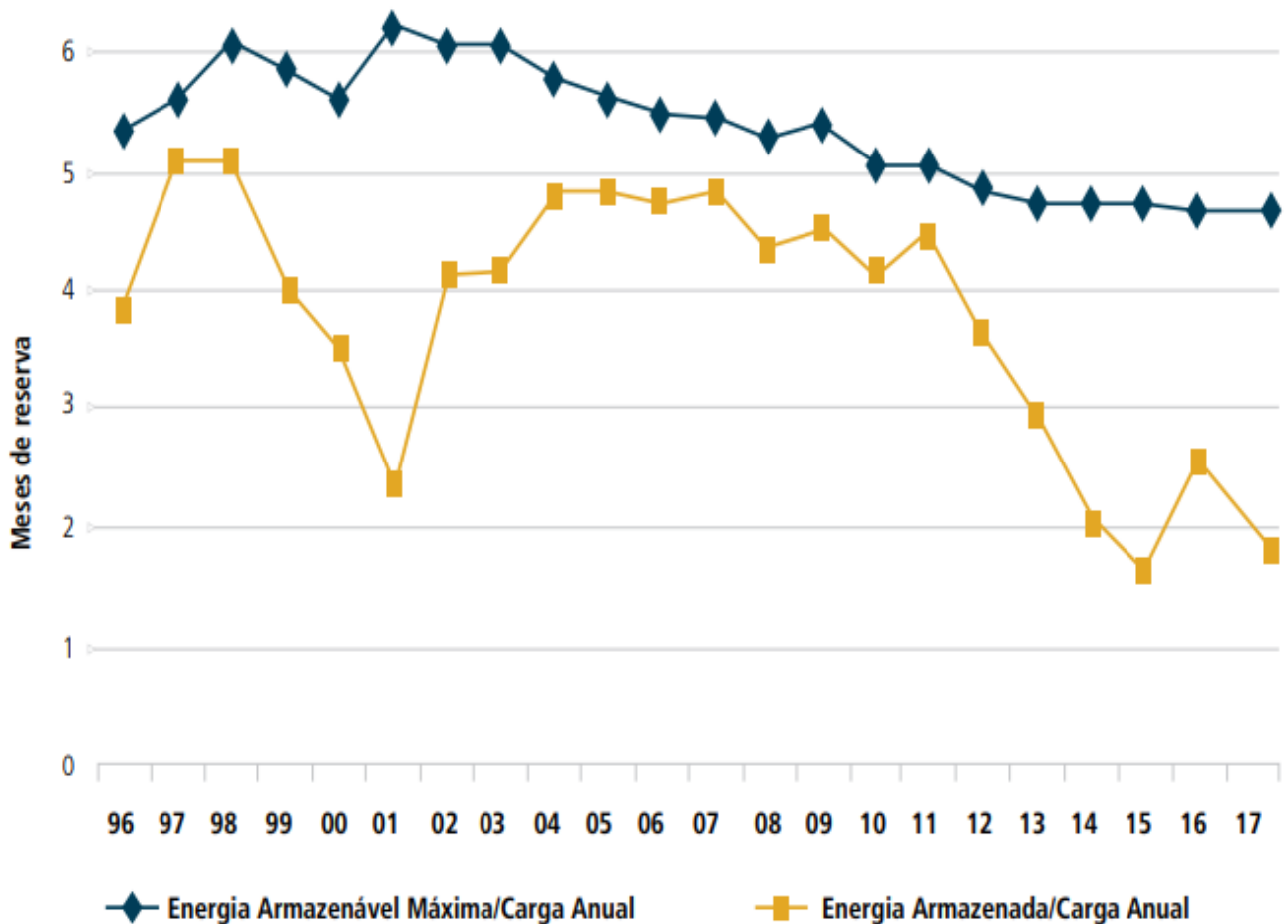
Logo, analisando o cenário futuro de energia, observa-se que a matriz elétrica brasileira tende a apresentar uma maior diversificação, uma vez que as fontes solar e eólica vêm ampliando significativamente sua participação no território nacional. Em contrapartida, as hidrelétricas tendem a perder espaço devido às restrições ambientais impostas à construção de novas usinas com grandes reservatórios (CIANCIARULLO, 2021; EPE, 2024).

Nesse contexto, uma alternativa para a geração de energia a partir da água são as hidrelétricas a fio d'água, que apresentam a vantagem de não necessitarem de reservatórios para operar. Contudo, o crescimento da participação desse tipo de usina não resulta em um aumento proporcional da capacidade de armazenamento de energia em relação à demanda. Isso ocorre porque, em períodos de estiagem, os reservatórios desempenham um papel fundamental ao funcionarem como grandes baterias, permitindo que a água acumulada seja utilizada para suprir parte significativa da demanda elétrica nacional. Assim, a menor presença desses reservatórios pode trazer desafios adicionais para a segurança elétrica do país (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018; CIANCIARULLO, 2021).

Logo, é possível imaginar que o fato do Brasil ser um país com diversas bacias hidrográficas e com a interconexão entre as redes de energia dos estados brasileiros, o problema de escassez de chuvas estaria resolvido, já que as diferentes regiões do

país poderiam ser utilizadas de suporte para outros estados. Porém, essa não é a realidade, já que temos evidências de que, nos últimos anos, os reservatórios têm tido um deplecionamento mais acentuado, pois eles não têm conseguido recuperar a reserva máxima e como consequência cada vez menos água armazenada, como é possível conferir na figura 2.(CNI, 2018)

Figura 2: Gráfico de Meses de reserva de energia desde 1996 até 2017



Fonte: CNI (2018)

Analisando a figura acima, percebe-se que a curva azul que representa a energia armazenável máxima segue em uma tendência de queda, o que demonstra que cada vez tem-se menos energia armazenada para períodos de escassez no SIN. Logo, com a maior participação das FRND, a perda da capacidade de regularização dos reservatórios e a falta de expansão de reservatórios hídricos, resultam em um Sistema Interligado Nacional cada vez mais exposto às variações do clima e, conseqüentemente, aumentando a sua imprevisibilidade de suprimento de energia elétrica (CNI, 2018).

Além disso, as fontes renováveis não despacháveis também podem causar problemas adicionais na rede elétrica, sobretudo a energia fotovoltaica. Isso ocorre porque o operador do SIN não possui controle direto sobre a geração dessas fontes, o que faz com que, em determinados momentos a energia produzida ultrapasse a demanda local. Nessa situação, surge um efeito chamado fluxo reverso, já que as redes de energia foram originalmente projetadas para operar de forma unidirecional, conduzindo a eletricidade apenas de grandes centrais para os consumidores, porém quando ocorre o fluxo contrário, há risco de aumento de tensão na rede, o que pode comprometer o desempenho e a segurança dos equipamentos conectados ao SIN (PETINRIN; SHAABAN, 2016).

Portanto, as usinas termelétricas entram como protagonistas para a solução destes problemas, já que elas são capazes de fornecer a flexibilidade necessária para o SIN, pois elas têm um rápido despacho, podem ser instaladas em qualquer região e não dependem de nenhum fator climático, apenas da disponibilidade de combustível e ainda são responsáveis por fornecer mais segurança para o Sistema Interligado Nacional (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O trabalho a ser desenvolvido tem como objetivo geral analisar o papel das usinas termelétricas para a segurança elétrica brasileira, visto que nos últimos anos ocorreu um aumento na oferta de energias renováveis, resultando imprevisibilidade no fornecimento de energia elétrica no Brasil.

### 1.2.1 Objetivos específicos:

- Analisar a situação da matriz elétrica brasileira e a contribuição das usinas termelétricas na estabilidade do fornecimento de energia.
- Avaliar os requisitos de flexibilidade e os parâmetros de Segurança Elétrica do Sistema Interligado Brasileiro.
- Discutir quais os tipos de Usinas Termelétricas existentes, além de analisar implicações ambientais e econômicas.

## 1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

O Brasil possui uma matriz elétrica diversificada e predominantemente renovável, e entre as fontes renováveis, destaca-se a fonte hidráulica com 55,8% de participação,

15% Eólica, 10,3% Autoprodução de energia e Geração Distribuída Renovável, 4,8% Térmicas Renováveis e 3,4% de energia Solar (EPE, 2024). Com base nestes dados, observa-se que uma parte considerável da matriz elétrica brasileira pode ser afetada em casos de períodos hidrológicos mais secos, com a escassez de ventos ou em períodos de baixa radiação solar; sendo assim, em cenários adversos é necessária a utilização das Usinas Termelétricas como uma fonte de energia para suprir a demanda elétrica do país (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

Dessa maneira, as usinas térmicas desempenham um papel importante por serem chamadas de fonte de energia despachável, no qual elas são responsáveis em suprir a potência ao sistema elétrico brasileiro a qualquer momento. Dentre as Térmicas existentes, temos como as principais: Carvão, Biomassa, Diesel, Gás Natural e a Nuclear. Cada uma das diferentes fontes termelétricas possui diferentes custos de construção, de combustível de operação, níveis de emissão de poluentes e diferentes quantidades de recursos hídricos necessários para o funcionamento da tecnologia. Portanto, é necessária uma longa avaliação de todos os parâmetros para a implantação de uma Usina Termelétrica no Sistema, pois isto impacta diretamente no custo final da energia para os consumidores (LAWSON; PEREIRA, 2017; CNI, 2018).

O Brasil possui um órgão que é responsável por toda a gestão elétrica brasileira, que é o Operador Nacional do Sistema (ONS), no qual ele administra o Sistema Interligado Nacional (SIN) desde 1998. O SIN nos últimos anos, foi marcado pela inserção das fontes Eólicas e Fotovoltaica, no qual trouxeram diferentes modos de operação para o ONS; isso resultou na necessidade de um grande trabalho para que todos os parâmetros de segurança, modelos matemáticos de previsão de carga líquida do sistema, previsão hidrológica e todos os fatores que impactam no SIN estejam dentro dos níveis normais, para que haja uma otimização dos recursos elétricos (OLIVEIRA, 2020).

Dadas estas circunstâncias, para entender a dimensão do que é a segurança elétrica e o papel das usinas termelétricas na matriz elétrica dos países será conduzida uma análise em bases científicas, como Scopus e o Web of Sciece, com as seguintes palavras: "thermoelectric", "flexibility" e "power generation". Com todos estes dados reunidos, utiliza-se a linguagem "R" para realizar da compilação dos arquivos, juntamente com os pacotes computacionais (Bibliometrix e Tydeverse) e, por fim, inseridos códigos de programação para a retirada de dados duplicados. A figura 3 indica os principais resultados da pesquisa.

Figura 3: Dados compilados de artigos sobre: "thermoelectric", "flexibility" e "power generation".



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

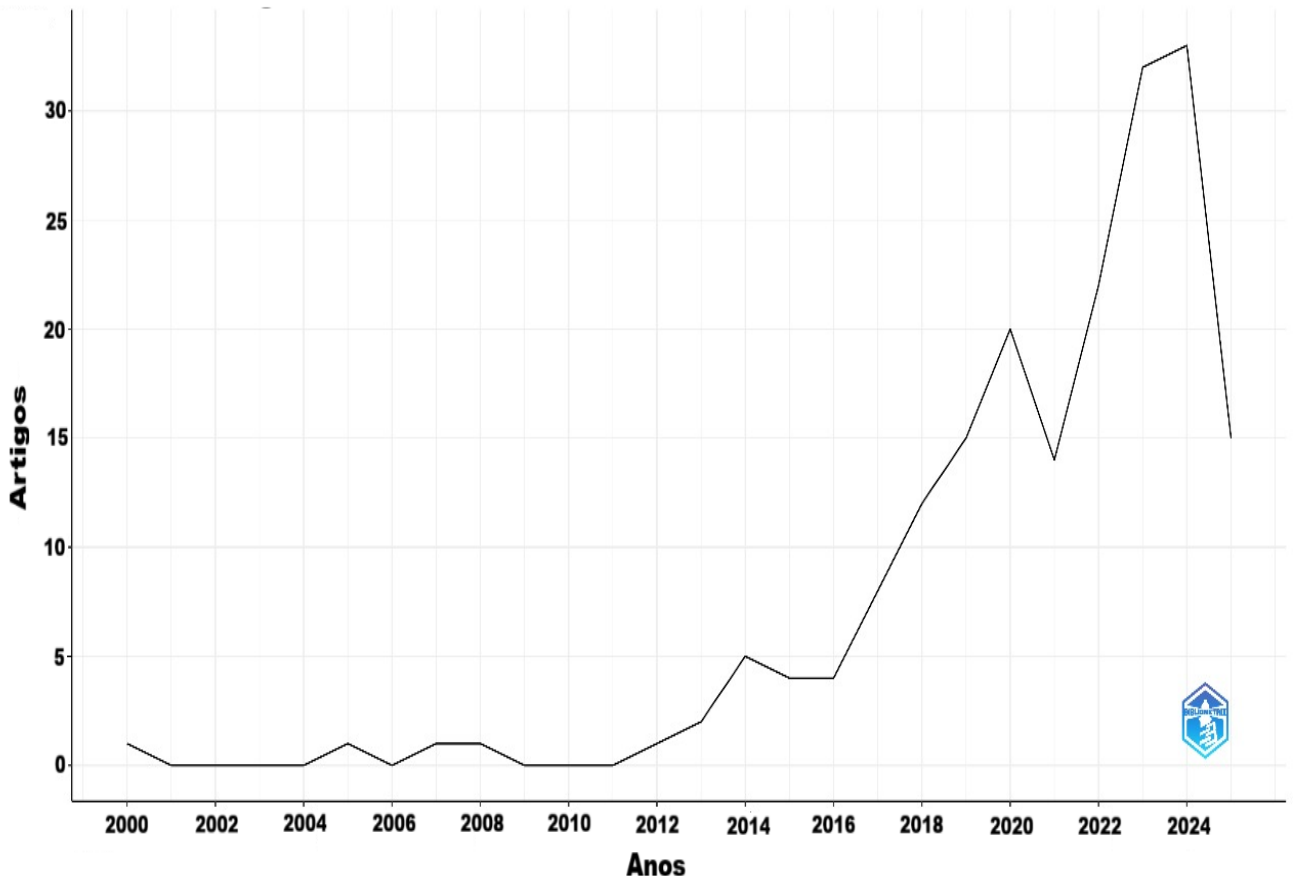
Com base na análise dos dados provenientes das bases científicas, é possível identificar que o tópico de usinas termelétricas para a geração de energia e sua relação com flexibilidade, é um tema pesquisado desde o ano 2000 até o ano atual de 2025, ou seja, este dado representa que há muitos anos pesquisa-se sobre a importância de usinas termelétricas para a segurança elétrica mundial.

Desta maneira, é relevante destacar que desde o início de pesquisas relacionadas com este assunto, 797 autores estiveram produzindo 191 estudos, demonstrando a grandiosidade deste tema. Além disso, estes trabalhos tem em média 29,55 citações por documento, evidenciado como estes artigos científicos contribuem para diversas produções acadêmicas, influenciando na visão mundial sobre a importância de fonte despacháveis na matriz elétrica dos países.

Assim, quando se trata de entender como este tema é relevante no âmbito mundial, é importante ressaltar o índice de coautoria internacional de 8,38%, no qual ele é capaz de revelar que uma parte considerável destes artigos é composto de visões e debates de diferentes países

No entanto, quando se aborda sobre a quantidade de artigos produzidos, a Figura 2 abaixo, conta com um gráfico destacando a produção total de artigos por ano sobre os temas pesquisados nas bases científicas.

Figura 4: Produção anual de artigos relacionados a: "thermoelectric", "flexibility" e "power generation".

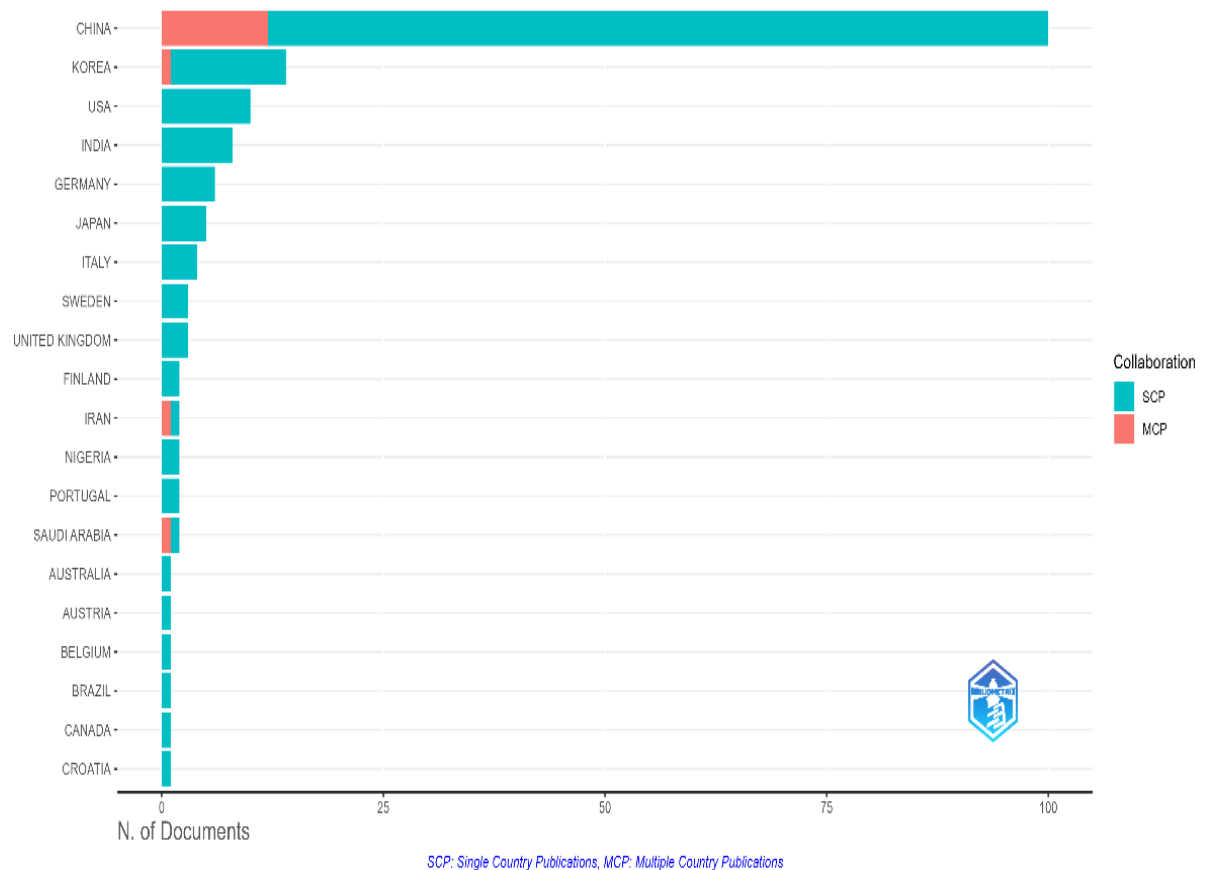


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Ao analisar-se a curva apresentada na Figura 4, observa-se que o tema de energia termelétrica começou a ter uma relevância maior de pesquisa a partir de 2012 e continua em constante crescimento até os dias atuais. Esse aumento coincide com o crescimento da pressão mundial para a transição elétrica e um maior uso de fontes renováveis para a geração de energia, pois em 2012 teve uma importante reunião do BRICS, na qual este grupo de países reconheceu a importância da cooperação mundial, focada no aumento das energias renováveis com foco na sustentabilidade. Assim, com a maior presença das renováveis é necessário que pesquisem alternativas quando as fontes renováveis não conseguirem suprir a demanda elétrica. (GÓMEZ; CHAMON; LIMA, 2012).

A este respeito, tem-se a figura 5 que contém um gráfico com os países que mais tem pesquisado sobre este tema.

Figura 5: Países com pesquisas relacionadas a "thermoelectric", "flexibility" e "power generation".



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A figura 5 que traz uma análise interessante dos países que mais tem pesquisas publicadas relacionadas com: "thermoelectric", "flexibility" e "power generation" dentre os artigos contemplados nas bases científicas. Pode-se observar que a China está disparada na frente das pesquisas, pois é um país que está liderando o tema de transição elétrica. Porém, quando olhamos para a situação do Brasil, temos que a quantidade de pesquisas publicadas sobre este tema é bem escasso, demonstrando que se deve ter uma maior atenção, visto a matriz elétrica brasileira atual.

Portanto, com base na justificativa e na análise bibliométrica, é possível constatar que a utilização de usinas termelétricas como uma fonte de energia aliada da segurança elétrica, é um tema extremamente relevante e que detém um grande interesse acadêmico.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, estruturados de forma a garantir a clareza e a coerência do desenvolvimento do tema.

O primeiro capítulo corresponde à introdução, na qual são apresentados a contextualização do problema, objetivo geral e específicos, a justificativa do estudo, a relevância científica e, por fim, a descrição da estrutura do trabalho. Este capítulo busca situar o leitor quanto à importância do tema e ao propósito da pesquisa desenvolvida.

O segundo capítulo compreende o referencial teórico, reunindo os principais conceitos e fundamentos necessários para a compreensão do estudo. São abordados o histórico de criação e organização do Sistema Elétrico Brasileiro, as principais fontes renováveis que compõem a matriz elétrica nacional, bem como os tipos e fontes de calor empregados nas usinas termelétricas. Além disso, são discutidos os impactos econômicos e ambientais relacionados ao uso dessas usinas, fornecendo a base conceitual para as análises posteriores.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada na elaboração do trabalho, detalhando o tipo de pesquisa adotada, os procedimentos de coleta e análise de dados, bem como a forma de organização das informações obtidas a partir das fontes bibliográficas.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões, nos quais são sintetizados os principais pontos levantados ao longo da pesquisa. Essa seção dedica-se à análise da relevância das usinas termelétricas para a segurança elétrica do Sistema Interligado Nacional, destacando sua importância no equilíbrio da oferta e demanda de energia elétrica no Brasil.

O quinto capítulo contempla as conclusões, reunindo as principais considerações obtidas com o desenvolvimento do estudo. Nesse momento, são retomados os objetivos propostos, discutindo-se de forma sintética as contribuições do trabalho e possíveis perspectivas para pesquisas futuras.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, assegurando a rastreabilidade e a confiabilidade das fontes consultadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: ESTRUTURA ORGANIZACIONAL, HISTÓRICO, SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

#### 2.1.1 Histórico da matriz Elétrica Brasileira

A história da energia elétrica no Brasil começou por volta de 1880, mesmo período em que outros países também iniciaram seu uso. No início, essa energia era escassa e utilizada apenas para alguns serviços públicos e atividades industriais. A partir de 1890, surgiram algumas empresas que prestavam o serviço de fornecimento de energia elétrica, porém sem regulamentações vigentes na época (RIBEIRO, 2005).

Desde o início, a energia hidrelétrica teve papel relevante na formação da matriz elétrica brasileira. Em 1883, foi construída a primeira barragem no Rio Jequitinhonha, com o objetivo de fornecer energia para uma mineração de diamantes. Somente em 1889 foi edificada uma barragem de grande porte no Rio Paraibuna, no sul de Minas Gerais (BURSZTYN; BERMANN, 2015).

Dessa maneira, com a queda da Monarquia em 1889 e a implantação da República, o setor elétrico começou a se desenvolver de forma mais expressiva. Em 1899, chegou à cidade de São Paulo o grupo canadense Light, que, em 1905, também se estabeleceu no Rio de Janeiro. A chegada desse capital estrangeiro foi favorecida pela chamada “Cláusula Ouro”, que estimulava investimentos externos como forma de proteção frente à crise cambial (RIBEIRO, 2005).

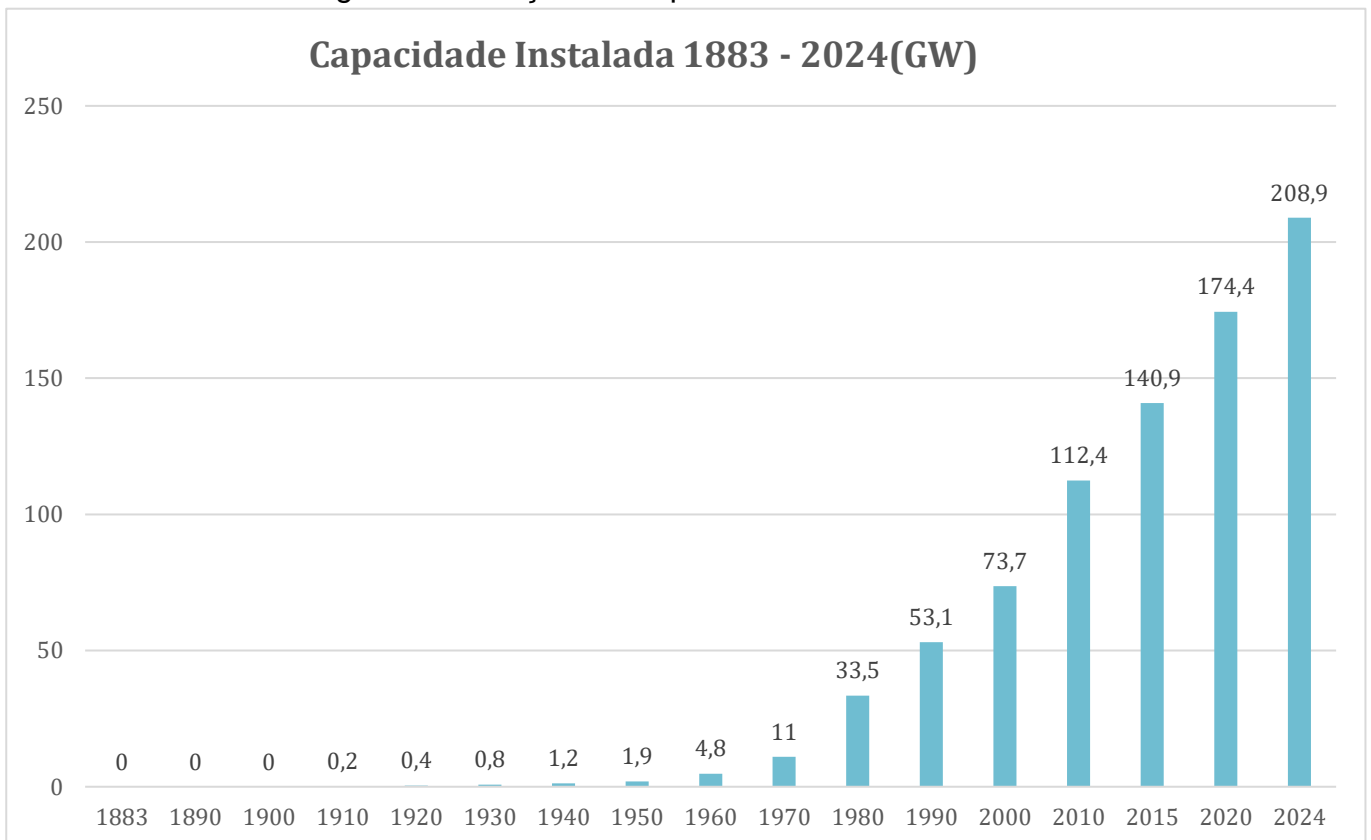
A Light atuou sozinha até 1927, quando chegou ao país o grupo americano Amforp, que passou a investir fortemente na infraestrutura elétrica brasileira. A partir de então, essas duas empresas passaram a monopolizar o mercado: a Light concentrou suas atividades no eixo Rio–São Paulo, enquanto a Amforp atuava no interior de São Paulo e em algumas capitais do país (RIBEIRO, 2005).

Em 1931, o governo extinguiu a “Cláusula Ouro”, que concedia benefícios aos investidores estrangeiros. Assim, em 1934, foi promulgado o Código de Águas, considerado o primeiro marco regulatório do setor elétrico brasileiro. A partir desse período, os investimentos no setor diminuíram drasticamente, com o capital privado desinteressado e o Estado ainda sem políticas públicas consolidadas para o setor (RIBEIRO, 2005).

Apenas em 1939 foi criado o Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), que passou a coordenar os trabalhos do setor elétrico sob a perspectiva do poder concedente. Desse período em diante, o setor elétrico passou a se desenvolver sob a liderança do Estado, com a criação de diversas empresas estatais, órgãos governamentais e outras entidades responsáveis por regulamentar e impulsionar o crescimento da matriz elétrica brasileira (RIBEIRO, 2005).

Sendo assim, a figura 6 apresenta a evolução da matriz elétrica brasileira, desde 1883 até 2015, evidenciando o crescimento exponencial impulsionado principalmente pelo processo de industrialização (MME,2017).

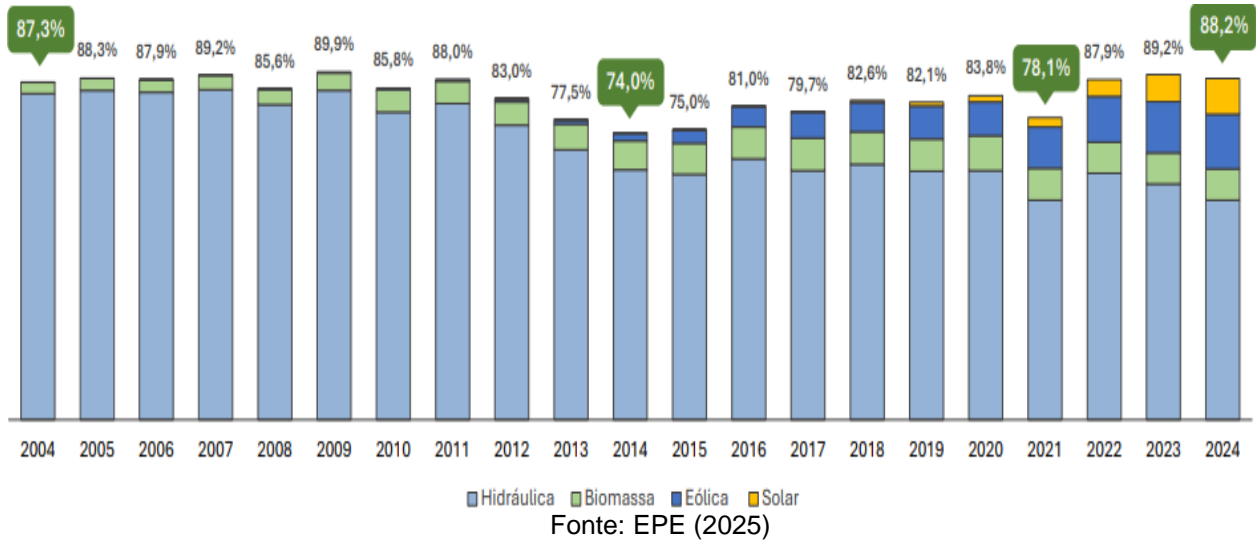
Figura 6: Evolução da Capacidade Instalada no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na imagem é possível identificar que a capacidade instalada de energia no Brasil nos anos iniciais era extremamente pequena, foi apenas entre a década de 50 e 60 que a capacidade instalada no Brasil teve aumentos consideráveis. Estes aumentos de energia foram baseados na energia hidrelétrica que teve grandes avanços, como podemos conferir na figura 7 que apresenta a participação da energia renovável (MME,2017).

Figura 7: Participação da Energia Renovável na Matriz Elétrica Brasileira



Na Figura 7, observa-se que a energia produzida a partir da hidroeletricidade apresenta uma grande presença desde o início da matriz elétrica brasileira até 2024, evidenciando a importância desse recurso para o sistema elétrico do país. (EPE,2025)

Portanto, é essencial que um país conte com uma matriz elétrica diversificada e com um planejamento eficiente para a expansão da carga do sistema, de modo que o crescimento ocorra de forma otimizada e organizada. Na próxima seção, será abordada a forma como o setor elétrico brasileiro foi construído ao longo do tempo e a atual organização (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

### 2.1.2 Estrutura organizacional sistema elétrico brasileiro

No início da eletrificação no Brasil, a demanda de energia era suprida por pequenas gerações ou sistemas de transmissão isolados. Além disso, para o avanço das criações de novas redes de energia e a ampliação da geração elétrica, os estudos eram comandados pelo capital privado. Porém, a partir da década de 1960 foi quando o Ministério de Minas e Energias (MME) iniciou o planejamento de expansão do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), que com o apoio do Comitê Coordenador dos Estudos Energéticos da Região Centro-Sul, realizaram trabalhos de levantamento de locais com potencial hídrico (OLIVEIRA, 2020).

Nas décadas seguintes, o SEB foi recebendo melhorias, no qual foi ampliando a sua capacidade de geração de energia com as usinas hidrelétricas e além da criação de novos Subsistemas Elétricos. Até que na década de 1980, o Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GPCS) comandado pela Eletrobrás, foi

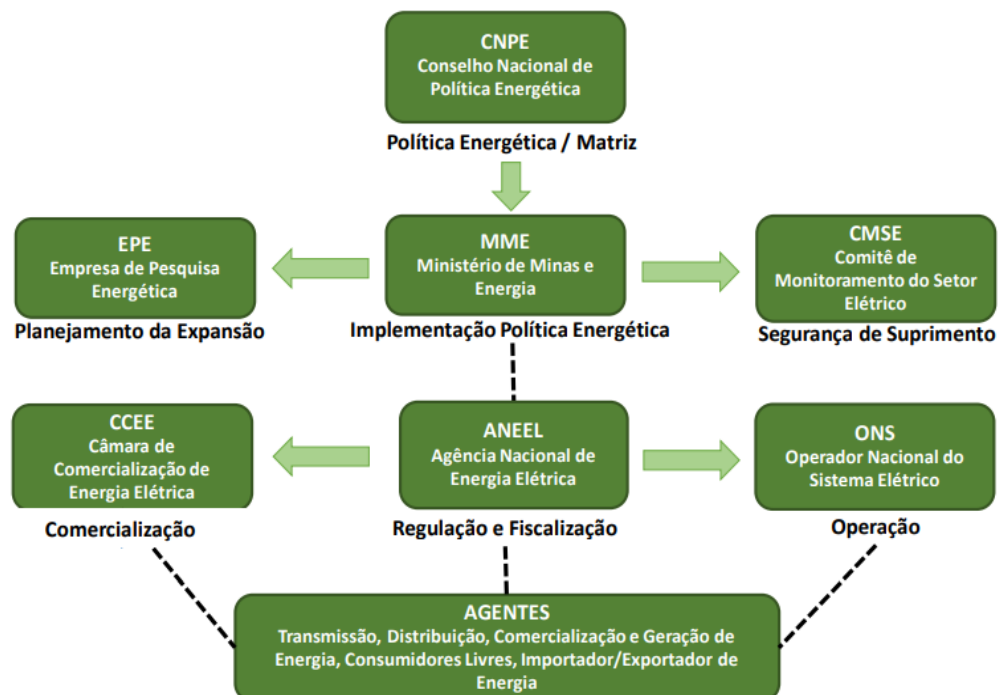
responsável pela a interligação dos Subsistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste/Norte, além da interligação do Norte/Sudeste concluída em 1999(OLIVEIRA, 2020).

Em paralelo, foi iniciado em 1996 o Projeto de Restruturação do Setor Elétrico Brasileiro teve como objetivo a criação de novos órgãos responsáveis pela gestão do SEB como: Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 1997, Operador Nacional do Sistema em 1998 e o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em 2000, órgão que sucedeu ao GPCS, além de realizar a separação das empresas de energia elétrica em três setores: geração, transmissão e distribuição (OLIVEIRA, 2020).

Contudo, mesmo com as melhorias, nos três primeiros anos do século XXI o Brasil viveu períodos de tensão por conta do racionamento de energia e crise do sistema elétrico. Dessa maneira, viu-se a necessidade de criar a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) com o objetivo de avaliar a situação do SEB e a capacidade de suprir a demanda necessária (OLIVEIRA, 2020).

Na figura 8 é apresentada a estrutura organizacional do Sistema Elétrico Brasileiro demonstrando a maneira como é disposta e na sequencia um detalhamento da função de cada entidade (BARBOSA; FERNANDEZ; GONÇALVES, 2022).

Figura 8: Estrutura Organizacional Sistema Elétrico Brasileiro



Fonte: Oliveira (2020)

- **Conselho Nacional de Política Energética (CNPE):** Instituído pela Lei no 9.478/1997 que tem como suas atribuições analisar a matriz elétrica do Brasil e propor políticas públicas e diretrizes para o SEB, com o intuito de garantir avanços estratégicos da matriz elétrica Brasileira.
- **Ministério de Minas e Energias (MME):** Um órgão vinculado ao gabinete presidencial, tem como suas principais funções instituir as políticas públicas que forem indicadas pelo CNPE, realizando Leilões de energia, contratos de concessão, entre outras atividades, além de ser o responsável por representar o setor elétrico no poder concedente.
- **Empresa de Pesquisa Energética (EPE):** Esta instituição tem como foco principal em subsidiar tecnicamente os órgãos do governo com estudos e pesquisas relacionadas ao planejamento elétrico brasileiro e de recursos energéticos.
- **Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL):** Implementa as políticas e diretrizes estabelecidas pelo Ministério de Minas e Energia (MME), gerenciando contratos de concessão, fiscalizando o cumprimento das regulamentações, definindo tarifas de energia e protegendo os direitos dos consumidores, garantindo a qualidade e a eficiência dos serviços no setor elétrico.
- **Câmara de Concessão de Energia Elétrica (CCEE):** Possibilita a comercialização de energia elétrica disponível no SIN no Ambiente de Contratação Regulada e no Ambiente de Contratação Livre.
- **Operador Nacional do Sistema (ONS):** Coordena o Sistema Interligado Nacional, sendo sua função principal o planejamento da geração de energia com foco na otimização da operação do sistema. Além disso, o órgão também atua na avaliação da necessidade de expansão do SIN, tanto na geração quanto na transmissão de energia.

Portanto, o Sistema Elétrico Brasileiro conta atualmente com diversos órgãos cuja função principal é planejar, regulamentar e operar o setor de energia no país, garantindo o fornecimento contínuo de eletricidade e a segurança elétrica do sistema da forma mais otimizada possível. Diante da importância desse planejamento, a próxima seção abordará as diferentes fontes renováveis existentes no Brasil e sua expansão nos últimos anos, sob a organização e regulamentação dos órgãos mencionados anteriormente (BARBOSA; FERNANDEZ; GONÇALVES, 2022).

### 2.1.3 Cenário atual das fontes renováveis presentes na matriz elétrica

Conforme demonstrado na Figura 1, o Brasil, devido ao seu extenso território e à abundância de recursos naturais, possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável. Nesta seção, serão detalhadas as principais fontes que compõem a matriz elétrica brasileira, com exceção das usinas termelétricas que serão abordadas em um capítulo específico. Destaca-se que dentro das categorias de Autoprodução de Energia (APE) e Geração Distribuída (GD), estão incluídas as fontes Hidráulica, Eólicas, Solar e Termelétricas (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

- Hidrelétricas:

A geração de energia a partir da força da água, utilizada para movimentar turbinas, representa 55,8% de toda a eletricidade produzida no Brasil. Como mencionado anteriormente, as hidrelétricas com reservatórios desempenham um papel fundamental ao garantir o fornecimento de energia durante períodos de estiagem. Essa capacidade de armazenamento torna essa fonte não apenas estratégica, mas também a principal forma de geração limpa da matriz elétrica brasileira (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018) (EPE, 2024).

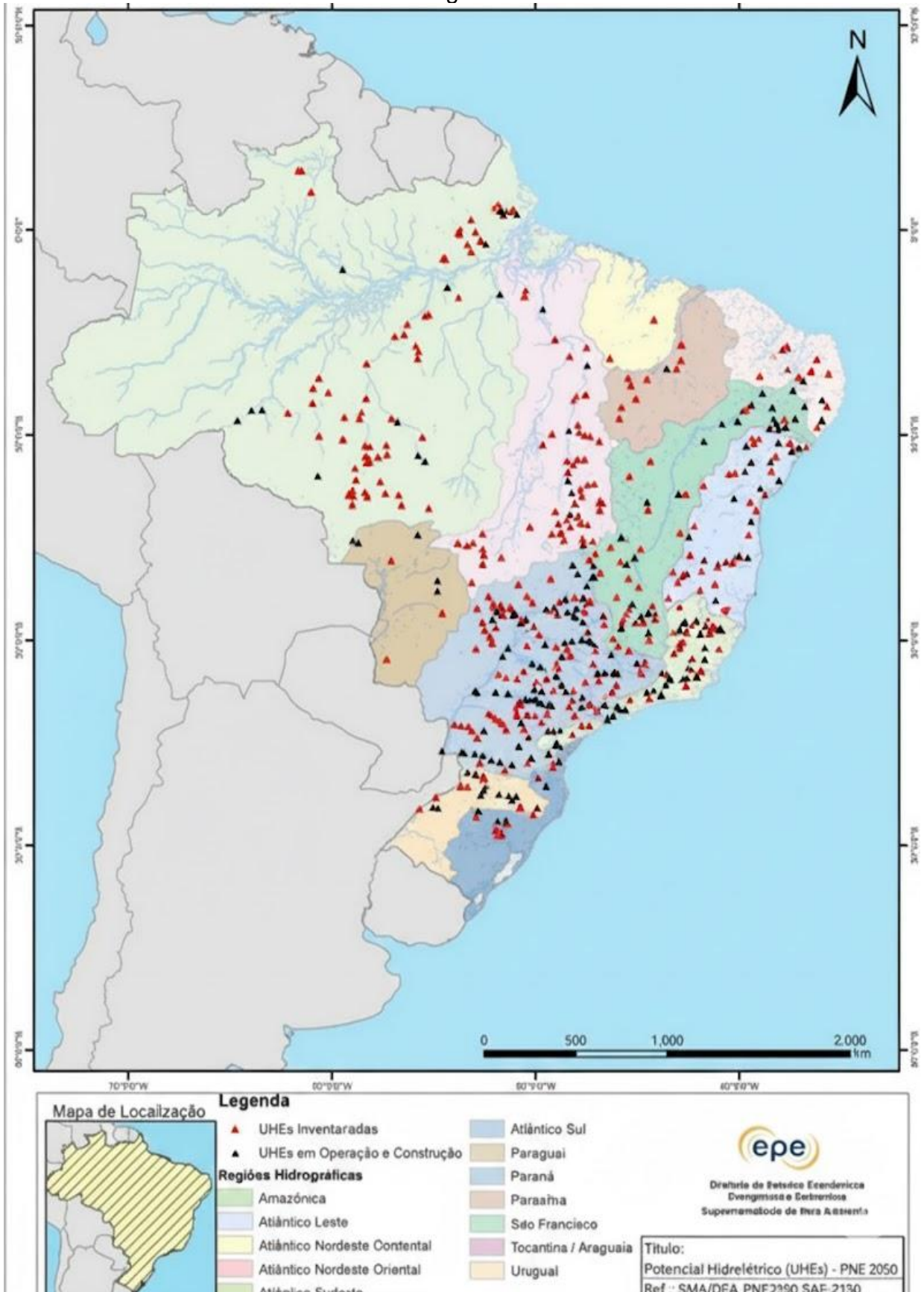
A seguir, será apresentada a tabela 1 e na sequência figura 9 com um mapa que analisam o potencial hidrelétrico brasileiro. No mapa, os triângulos vermelhos indicam as Usinas Hidrelétricas (UHEs) já inventariadas, ou seja, locais com potencial para geração de energia. Já os triângulos pretos, representam as UHEs que estão em operação ou em fase de construção (EPE, 2018).

Tabela 1: Potencial hidrelétrico brasileiro para os estudos de longo prazo

Etapa	UHEs (GW)	Projetos de até 30 MW (GW)	Total (GW)	Participação (%)
Operação e Construção	102	6	108	62
Potencial Hidrelétrico Inventariado	52	16	68	38
Potencial hidrelétrico do PNE 2050	154	22	176	100

Fonte: Adaptado de EPE (2018)

Figura 9: Distribuição do potencial hidrelétrico (UHes) do PNE 2050 por região hidrográfica



Fonte: Adaptado de EPE (2018)

A análise do mapa da figura 9, permite-se concluir que o Brasil é rico em recursos hídricos e possui diversas bacias hidrográficas, o que possibilita que grande parte da matriz elétrica nacional seja composta por usinas hidrelétricas. Atualmente, de acordo com a tabela 1, o país possui 108 GW de potência instalada. No entanto, como mencionado anteriormente, a expansão de hidrelétricas com reservatórios enfrenta grandes desafios ambientais (EPE, 2018).

Considerando o potencial ainda não explorado, o Brasil possui cerca de 52 GW que poderiam ser incorporados à matriz elétrica. Sendo assim, é importante destacar que aproximadamente 77% desse potencial inventariado está localizado em áreas legalmente protegidas, como terras indígenas, territórios quilombolas ou unidades de conservação (EPE, 2018).

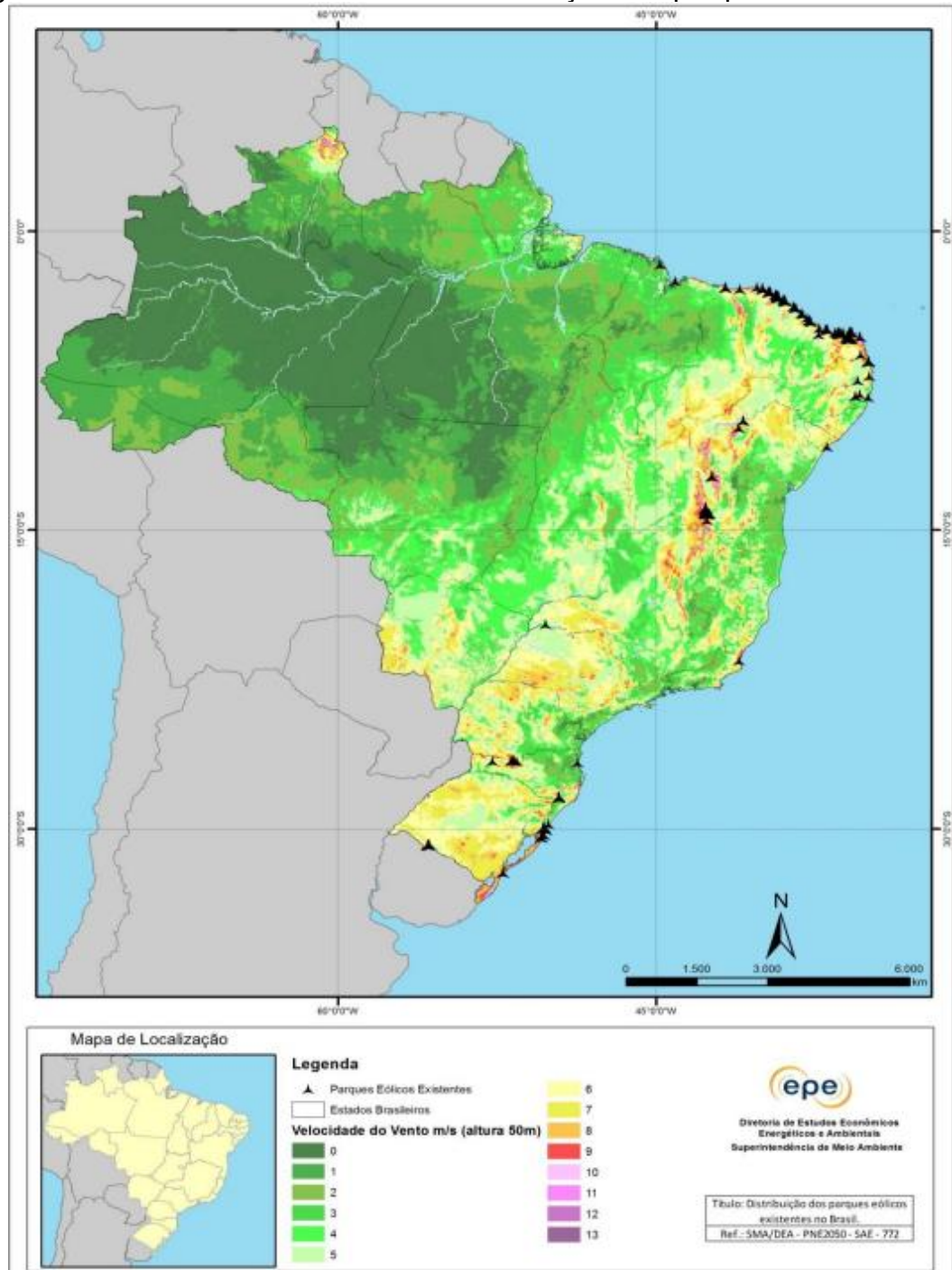
Dessa forma, as hidrelétricas continuarão exercendo um papel extremamente relevante na matriz elétrica brasileira. Contudo, é importante reconhecer que a expansão dessa fonte nos próximos anos será limitada por restrições socioambientais significativas (CNI, 2018).

- Eólicas

A energia eólica, que utiliza a força dos ventos para movimentar as pás de grandes aerogeradores, ocupa atualmente 15% na matriz elétrica brasileira, com grande potencial de expansão onshore e offshore. Trata-se de uma fonte extremamente limpa, sem emissões de carbono durante sua operação. No entanto, um dos principais desafios dessa tecnologia é a intermitência e a baixa previsibilidade, já que sua geração depende da intensidade e constância dos ventos. Por esse motivo, é classificada como uma fonte não despachável, ou seja, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) não tem controle direto sobre a quantidade de megawatts que será injetada no SIN (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018) (EPE,2024).

Abaixo, apresenta-se um mapa na figura 10, que indica os principais parques eólicos em operação no Brasil. Além disso, diferentes cores representadas na imagem correspondem às variações na velocidade dos ventos em cada região, permitindo identificar as áreas com maior potencial para a geração eólica (EPE,2018).

Figura 10: Potencial eólico estimado e distribuição dos parques eólicos no Brasil



Fonte: EPE (2018)

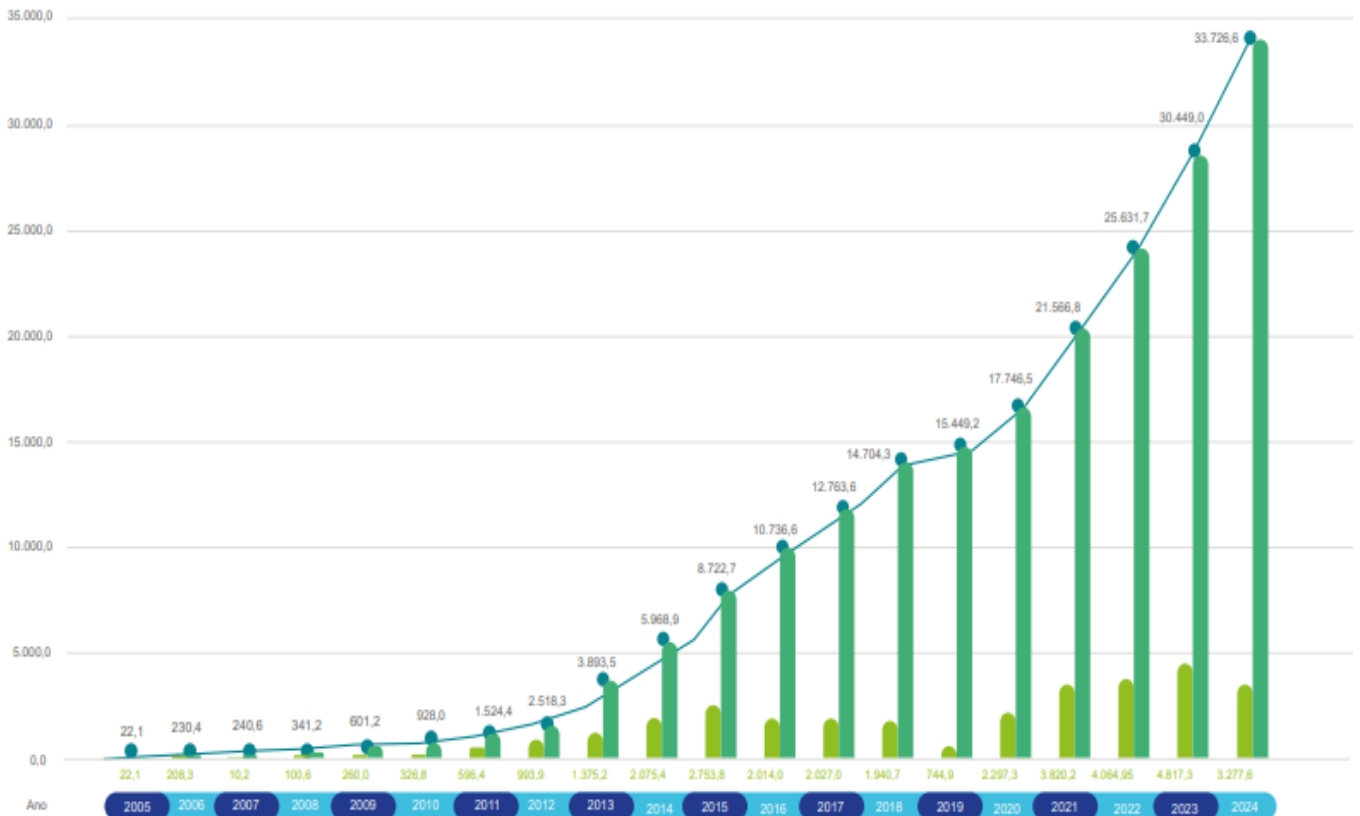
No Brasil, a energia eólica está predominantemente concentrada na região Nordeste, onde se encontra o maior potencial de geração, o que garante alto aproveitamento dos aerogeradores. No Sul do país também há parques eólicos já instalados, porém, ao observar a imagem, nota-se que a maioria desses empreendimentos estão localizados no litoral e isso ocorre por conta de estas áreas apresentarem ventos mais constantes e intensos, favorecendo a instalação das

turbinas. Considerando que o Brasil possui uma extensa faixa litorânea, o potencial para expansão da energia eólica é significativo (Bezerra,2023).

Na figura 11, será apresentado a evolução da capacidade instalada no Brasil de Turbinas Eólicas desde as primeiras instalações eólicas no brasil (ABEEÓLICA, 2025).

Figura 11: Evolução da capacidade instalada de Energia Eólica no Brasil

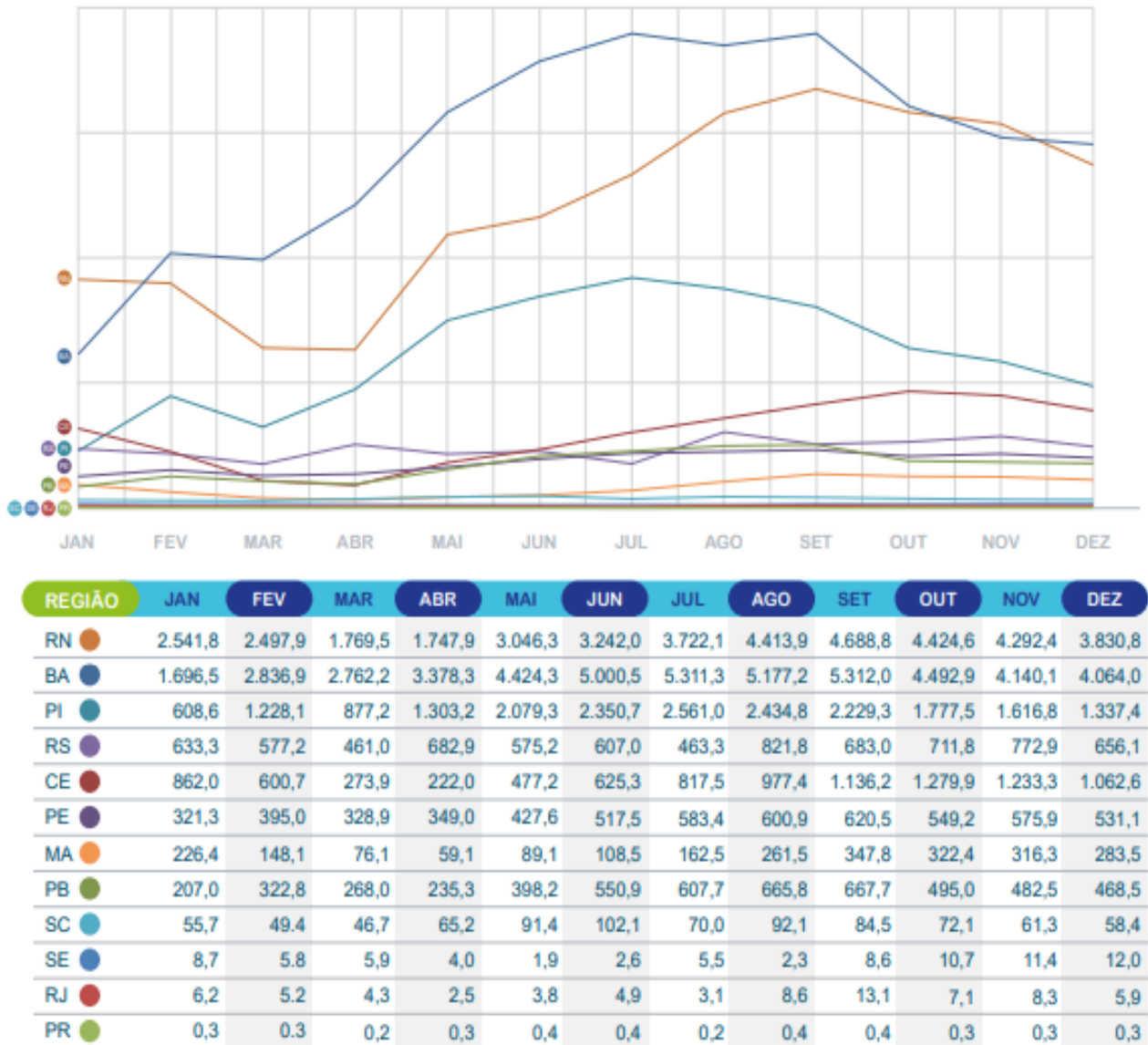
#### Evolução da Capacidade Instalada (MW)



Fonte: ABEEÓLICA (2025)

A partir de 2012, o Brasil passou a apresentar um ritmo mais acelerado na implantação de parques eólicos. Nos últimos cinco anos, a capacidade instalada dessa fonte praticamente dobrou, evidenciando um forte crescimento e um aumento significativo nos investimentos no setor. Diante desse cenário, é possível afirmar que a energia eólica continuará ganhando espaço na matriz elétrica brasileira. Como demonstrado na imagem anterior, o país ainda possui um vasto potencial a ser explorado, especialmente em regiões litorâneas, onde há grande abundância de ventos favoráveis à geração de energia. A seguir apresenta-se na figura 10 a geração de Megawatts médio dividido por estado no Brasil. (ABEEÓLICA, 2025).

Figura 12: Geração Média de Energia Eólica Separada por Estados



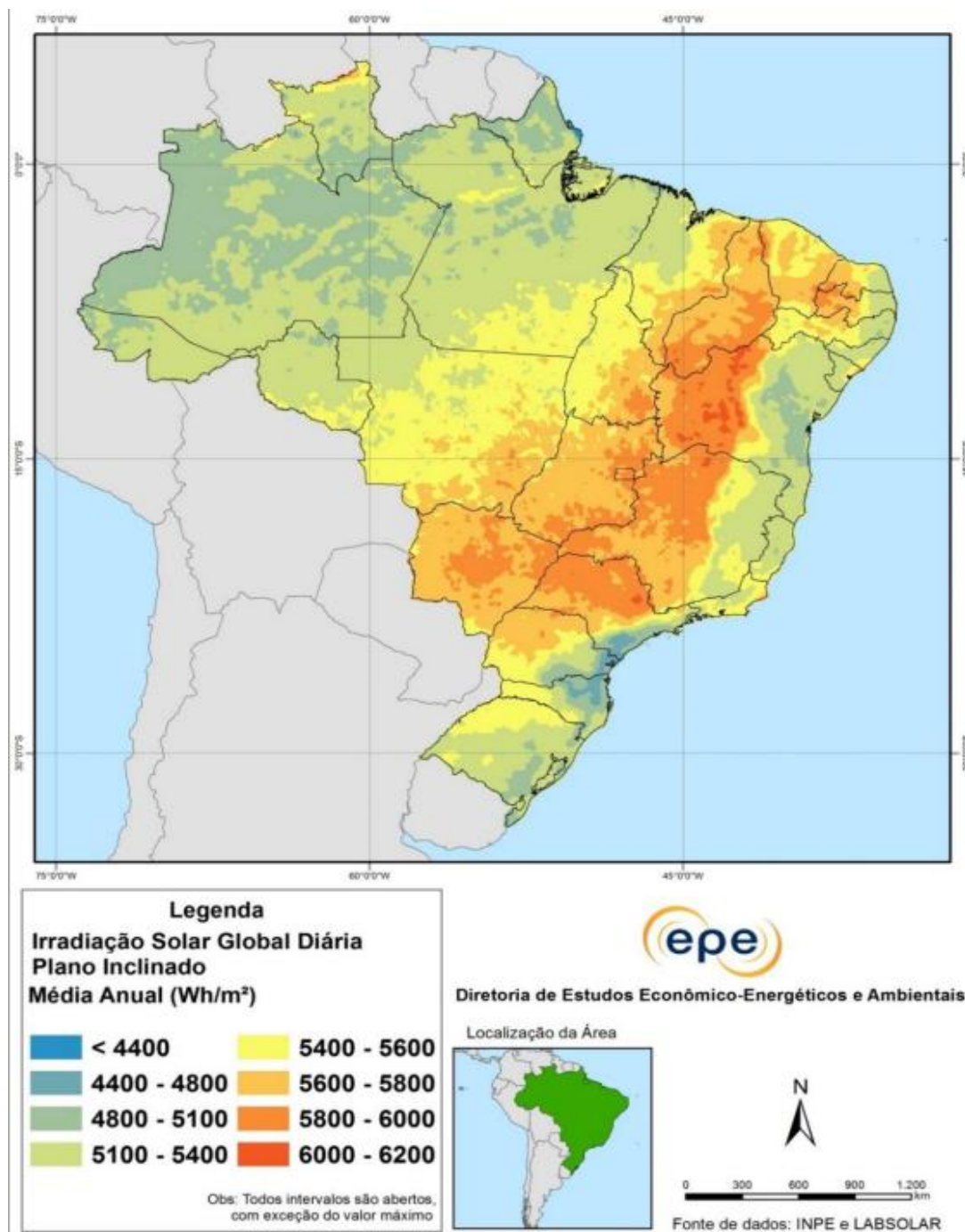
Fonte: ABEEÓLICA (2025)

Um dos principais desafios da inserção da energia eólica na matriz elétrica está relacionado à variabilidade dos ventos ao longo do ano. Ao analisar a imagem, observamos a geração nos estados do Rio Grande do Norte, Bahia e Piauí como exemplo. Em janeiro, esses estados geraram, respectivamente, 2.541,8 MW, 1.696,5 MW e 608,6 MW. Já em agosto, os valores aumentaram para 4.413,9 MW, 5.177,2 MW e 2.434,8 MW, respectivamente. A soma da geração média de estes estados em janeiro foi de 4.846,9 MW, enquanto em agosto chegou a 12.025,9 MW, o que representa cerca de três vezes mais, evidenciando o impacto da sazonalidade na produção eólica (ABEEÓLICA, 2025).

- Solar

A energia solar apresentou um crescimento acelerado nos últimos anos. Entre 2023 e 2024, houve um aumento de 28,1% na capacidade instalada, totalizando 48,5 GW. Esse avanço se deve, principalmente, ao elevado nível de irradiação solar no território brasileiro, fator que favorece a geração fotovoltaica. Essa característica pode ser observada na figura 13, que apresenta um mapa da irradiação solar em território brasileiro. (EPE, 2025)

Figura 13: Mapa da Irradiação Solar no Brasil

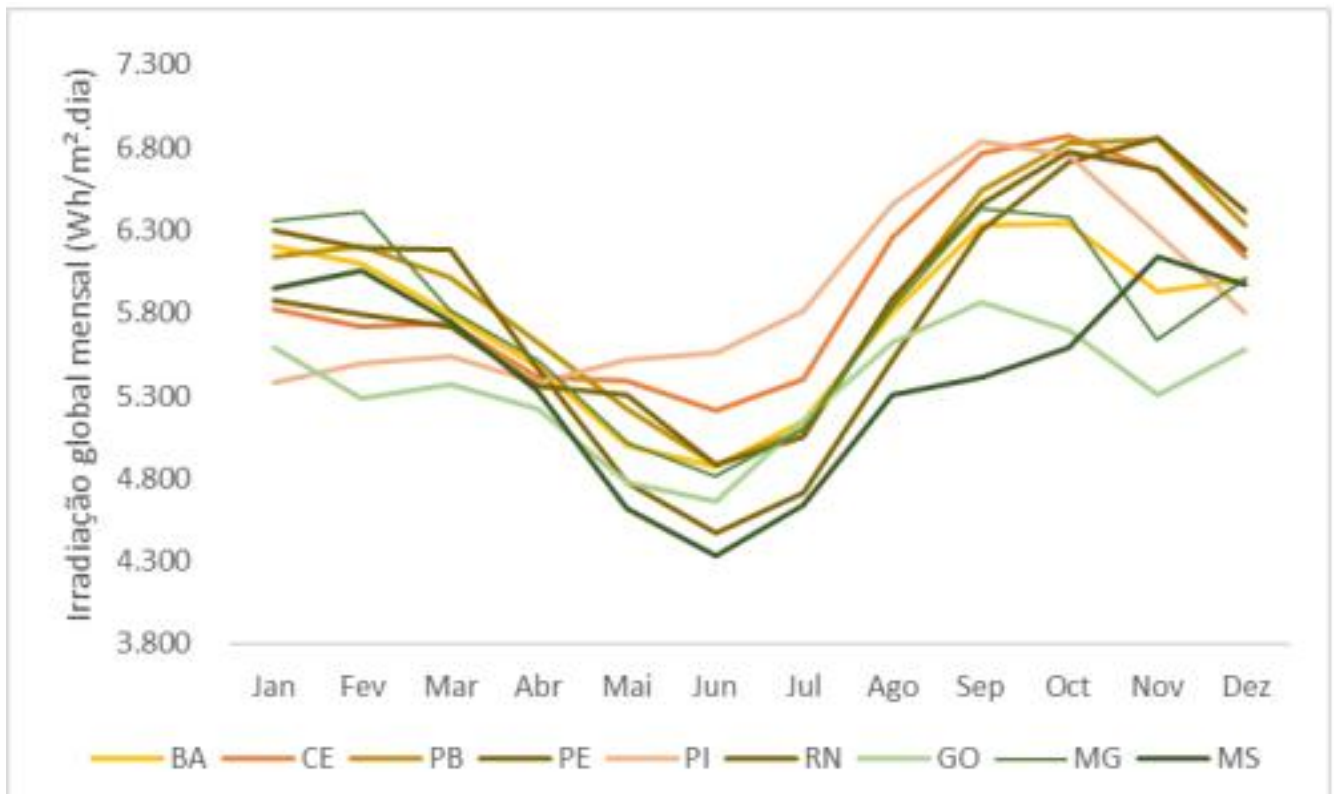


Fonte EPE (2018)

Ao analisar a imagem, percebe-se que o Brasil apresenta, em sua maior parte, níveis elevados de radiação solar. As áreas com baixa irradiação, representadas pela cor azul no gráfico, são limitadas a poucas regiões do território. Isso significa que, na maior parte do país, a instalação de painéis fotovoltaicos é viável e eficiente, devido à alta disponibilidade de luz solar. Como resultado, a energia solar vem ampliando sua participação na matriz elétrica brasileira, consolidando-se como uma das principais fontes renováveis em crescimento (EPE, 2025).

No entanto, assim como outras fontes renováveis, a energia fotovoltaica também é impactada pela sazonalidade. Essa variação ao longo do ano afeta diretamente a quantidade de energia gerada, como pode ser observado no gráfico abaixo (EPE, 2025).

Figura 14: Variação da Irradiação Global nos meses



Fonte: EPE (2023)

Ao longo dos meses do ano, a irradiação solar varia entre os estados brasileiros, como pode ser observada na figura 14. Nota-se que a irradiação diminui gradativamente até o meio do ano e, em seguida, volta a aumentar. Essa variação impacta diretamente a quantidade de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos (EPE, 2023).

Diante dos cenários hídricos, eólicos e fotovoltaicos apresentados, é possível identificar que o Brasil está sujeito às interferências da sazonalidade na geração de energia, uma vez que essas fontes renováveis representam grande parte da matriz elétrica nacional (EPE, 2023).

Por isso, torna-se fundamental um planejamento rigoroso para garantir que a expansão e a operação do SIN sejam realizadas da forma mais eficiente possível e com segurança elétrica, que pode ser garantida pelas usinas termelétricas (EPE, 2023).

## 2.2 USINAS TERMELÉTRICAS

### 2.2.1 Principais fontes energéticas de usinas termelétricas no Brasil

As usinas termelétricas atuam como uma importante fonte de segurança no Sistema Interligado Nacional. Como mencionado anteriormente, as fontes renováveis estão sujeitas à sazonalidade, o que pode comprometer a regularidade do fornecimento de energia, sendo justamente nesse ponto crítico que as usinas térmicas ganham relevância (CIANCIARULLO, 2021).

De funcionamento relativamente simples, as termelétricas têm como objetivo a geração de energia elétrica a partir do calor e esse calor pode ser obtido, principalmente, por meio do urânio (em usinas nucleares), óleo diesel, carvão mineral, gás natural ou biomassa. Assim, com o armazenamento destes combustíveis, uma usina termelétrica está disponível para gerar energia a qualquer momento. Dessa maneira, nessa seção será aprofundado sobre os combustíveis para o funcionamento de cada tipo de usina termelétrica citado acima. (CIANCIARULLO, 2021).

- **Gás Natural**

O gás natural ganhou maior relevância na matriz elétrica devido à sua abundância em diversos países e à sua versatilidade de uso, especialmente no setor industrial e geração de energia. Além disso, apresenta uma vantagem significativa em relação a outros derivados do petróleo e ao carvão mineral, pois sua queima emite menores quantidades de poluentes, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados à geração termelétrica (CIANCIARULLO, 2021).

Na sequência é apresentada na figura 15, um gráfico com as principais reservas de gás natural do mundo.

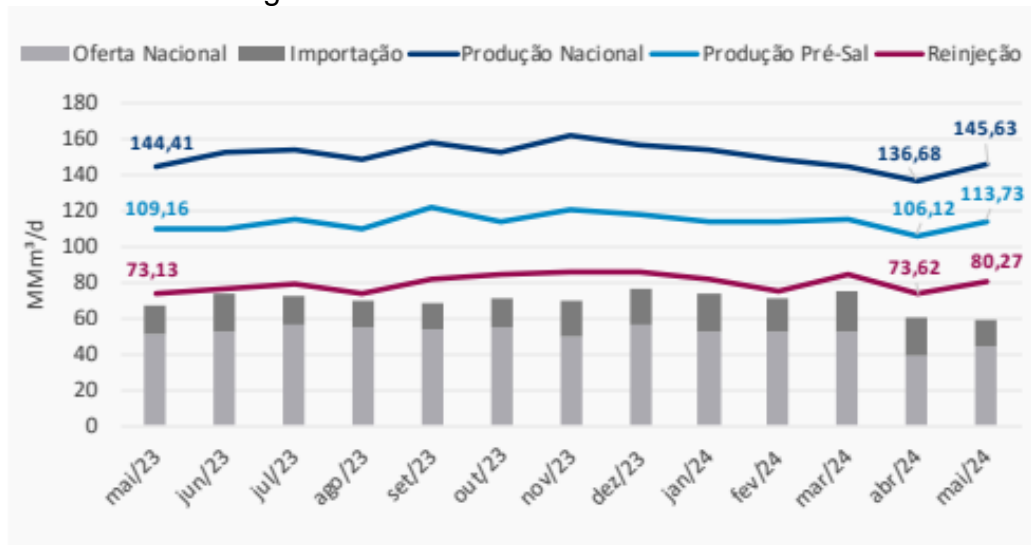
Figura 15: Reservas de Gás Natural no Mundo



Fonte: Banco do Nordeste (2024)

Observa-se que as reservas mundiais de gás natural estão distribuídas de forma desigual, sendo que apenas três países concentram aproximadamente 50% do total. Nesse contexto, o Brasil ocupa a 29ª posição no ranking global, com reservas estimadas em 434 bilhões de metros cúbicos. Dessa forma, na figura 16 seguinte pode-se compreender sobre a produção brasileira de Gás Natural (VIANA, 2024).

Figura 16: Consumo Interno Gás Natural

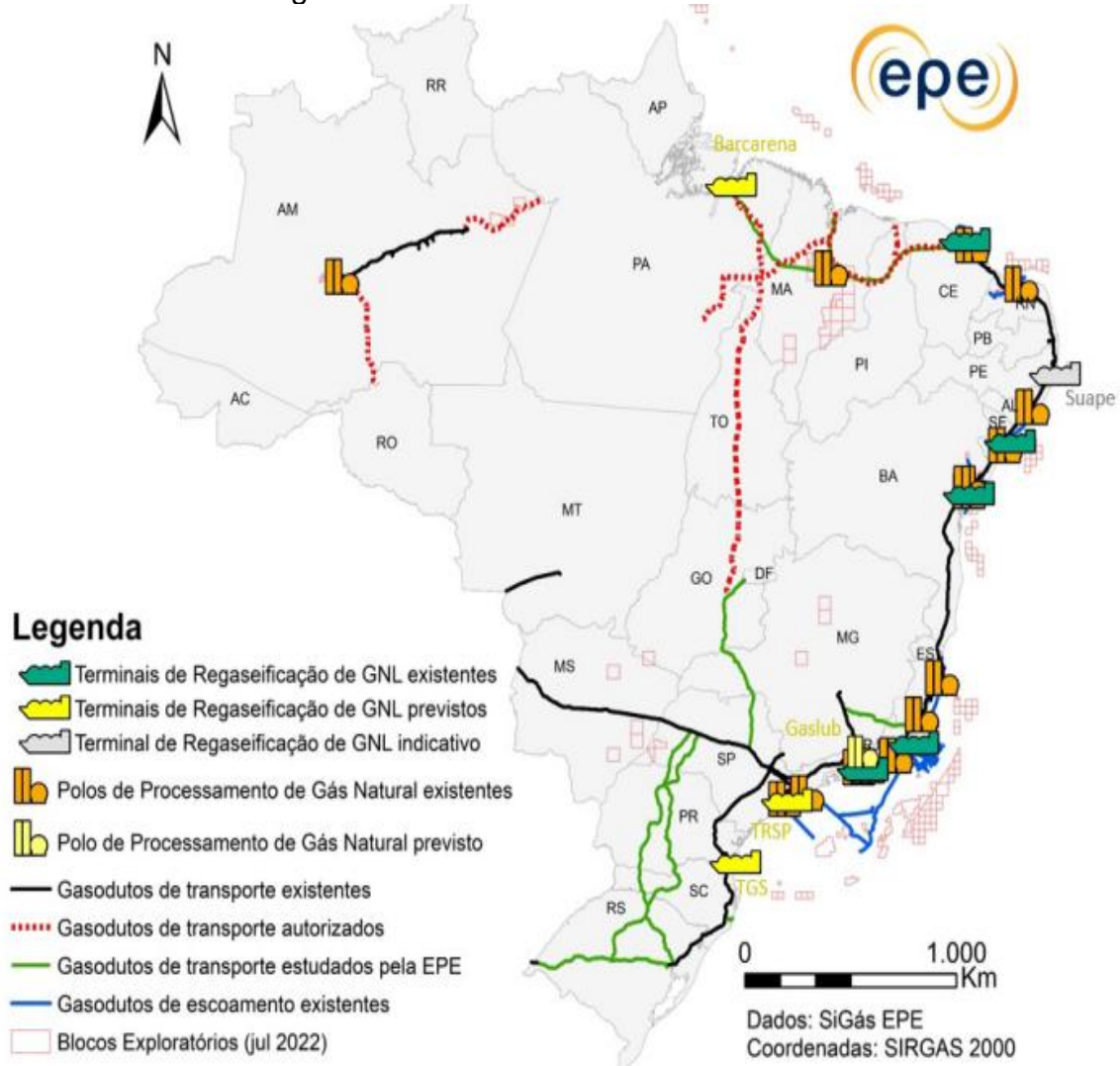


Fonte: Fundação Getúlio Vargas (2024)

Ao analisar o gráfico, observa-se que o Brasil não é autossuficiente na produção de gás natural, uma vez que parte do consumo interno é suprida por meio de importações. Outro ponto relevante é a concentração da produção proveniente do pré-sal, pois, diante da limitação das reservas conhecidas atualmente, essa dependência representando um risco para o futuro caso não sejam descobertas novas jazidas (FGV,2024).

Além dos desafios relacionados à produção, o país também enfrenta dificuldades no escoamento interno do gás natural, apresentado na figura 17.

Figura 17: Gasodutos existentes no Brasil



Fonte: EPE (2024)

A rede de gasodutos no Brasil está localizada majoritariamente na região litorânea, onde se encontram a maior parte dos blocos exploratórios de gás natural. Isso favoreceu a instalação da infraestrutura de terminais de regaseificação e polos de processamento nessa mesma faixa costeira, permitindo o escoamento eficiente da produção. Além disso, destaca-se o gasoduto Bolívia-Brasil, que cruza o território nacional e representa um importante via de importação para complementar o suprimento interno de gás natural (EPE,2024).

Observa-se também a existência de projetos de expansão da malha de gasodutos, com algumas linhas já autorizadas e outras em fase de estudo, o que

representa um avanço estratégico para ampliar o uso e a distribuição do gás natural no país (EPE,2024).

- **Carvão Mineral**

O carvão mineral é um combustível utilizado no Brasil há muitos anos, tendo ganhado maior relevância após a Primeira Guerra Mundial. No entanto, o país possui reservas limitadas desse recurso, representando apenas 1,2% das reservas mundiais, e atualmente consome cerca de 0,5% da produção global. No Brasil, as principais minas estão localizadas na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (COSMO et al., 2020).

Trata-se de um mineral complexo, com diferentes tipos que variam de acordo com sua formação geológica. Sua extração é desafiadora, exigindo escavações profundas e processos de beneficiamento específicos. O carvão utilizado na geração de energia elétrica representa um desafio ambiental, por ser altamente poluente, sua queima libera substâncias tóxicas, como enxofre e gases que podem contribuir para a formação da chuva ácida (COSMO et al., 2020).

Atualmente, com o avanço da tecnologia, é possível instalar filtros e realizar tratamentos no carvão, reduzindo seu impacto ambiental. Ainda assim, embora o carvão seja uma das principais fontes de geração elétrica no mundo, seu uso no Brasil é mais limitado, principalmente devido a fatores ambientais e à baixa disponibilidade de reservas (COSMO et al., 2020).

- **Óleo Diesel**

O óleo diesel é um combustível que, atualmente, é amplamente utilizado no Brasil em sistemas isolados, ou seja, em regiões onde a rede elétrica não está conectada ao Sistema Interligado Nacional. Nessas áreas mais remotas, como partes do Acre, Rondônia e outros estados da região Norte, a geração termelétrica a partir do óleo diesel é a principal alternativa para garantir o fornecimento de energia elétrica. (FERREIRA; LORA; CORREIA, 2018)

- **Biomassa**

Quando se trata de biomassa, estamos falando de um combustível mais abrangente. A biomassa pode ser definida como uma substância renovável de origem vegetal ou animal, utilizada para a geração de energia ou produção de insumos químicos. Entre os principais exemplos de biomassa estão a cana-de-açúcar, milho, soja, algodão, entre outros (EPE, 2016).

A biomassa se destaca como a principal matéria-prima para substituir os combustíveis fósseis, pois durante seu cultivo ocorre a absorção de  $\text{CO}_2$ , e na queima, esse mesmo  $\text{CO}_2$  é liberado, tornando o processo praticamente neutro em emissões, não representando uma adição líquida de poluentes à atmosfera. No entanto, para que sua utilização seja eficiente e menos impactante, é necessário um bom processamento, a fim de evitar a presença de materiais indesejados na mistura (EPE, 2016).

Para medir a capacidade produtiva dos países em relação à biomassa, foi criado um indicador chamado Net Primary Production (NPP), que avalia basicamente a produtividade da biomassa plantada por hectare e será apresentado na figura 18.

Figura 18: Net Primary Production Brasil



Fonte: EPE (2016)

Quando comparado à média global, o Brasil apresenta um desempenho significativamente superior na produção de biomassa. Esse destaque se deve à forte presença dos setores agrícola e de papel e celulose, que são os principais responsáveis pela geração de energia a partir da biomassa no país. Nesses setores, a biomassa é utilizada principalmente para suprir a demanda interna de energia e calor das unidades industriais. No entanto, em alguns casos, há excedente de energia gerada, o qual pode ser comercializado com o sistema elétrico (EPE, 2016).

- **Urânio**

A energia nuclear a partir do urânio tem ganhado destaque nas discussões atuais por ser uma fonte livre de emissões de carbono. No entanto, o histórico de acidentes graves, a pressão da opinião pública e as dificuldades relacionadas ao descarte de resíduos radioativos ainda geram receios e impõem diversas barreiras à expansão dessa tecnologia (EPE, 2016).

Atualmente, muitos países já operam usinas nucleares, o que exige atenção constante quanto à segurança. No Brasil, estão em funcionamento as usinas Angra 1 e Angra 2, que juntas produzem cerca de 2 GW de energia. Há ainda uma terceira usina em construção desde 2007, a Angra 3 (EPE, 2016).

Para atender à demanda interna por urânio, o país conta com a empresa estatal Indústrias Nucleares do Brasil (INB), única autorizada a realizar a extração do mineral. Atualmente, a única mina de urânio em operação está localizada na cidade de Caetité, na Bahia. As reservas brasileiras de urânio somam cerca de 278 mil toneladas, o que posiciona o Brasil como a sétima maior reserva do mundo. No entanto, esse número pode ser significativamente maior, já que ainda são baixos os investimentos em prospecção do mineral no país (EPE, 2016).

Portanto, foram apresentadas as principais fontes energéticas utilizadas nas usinas termelétricas no Brasil. Dessa maneira, na seção seguinte será apresentado como funcionam as tecnologias responsáveis por transformar o calor gerado por essas fontes em energia elétrica (EPE, 2016).

### 2.2.2 Tecnologias de Conversão Energética em Usinas Termelétricas

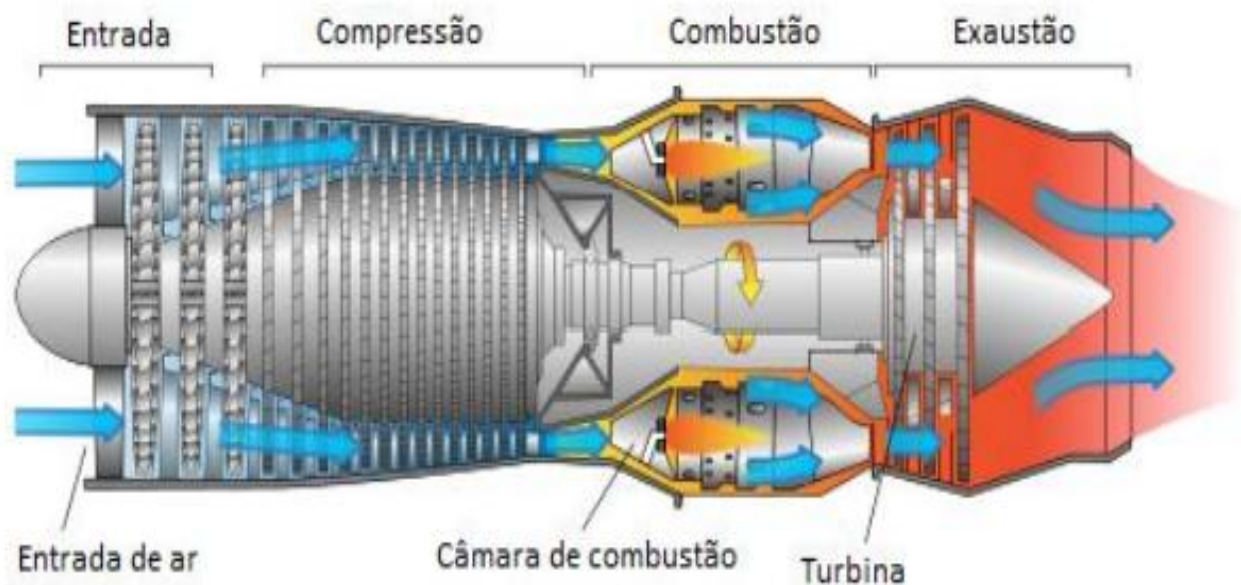
Como visto anteriormente, o funcionamento das usinas termelétricas baseia-se na transformação de energia térmica em energia elétrica. Existem diversas fontes térmicas possíveis, cada uma com características específicas. Por isso, diferentes processos são empregados na geração termelétrica, sendo importante compreender quais tecnologias são utilizadas e quais combustíveis são mais adequados para cada uma delas (EPE, 2016).

As turbinas modernas são máquinas altamente versáteis, capazes de operar com diferentes combustíveis, como gás natural, diesel, biodiesel, etanol, biogás, hidrogênio e outros. Essa flexibilidade, que inclui o uso de combustíveis renováveis, as torna importantes aliadas no processo de descarbonização (MOLIÈRE, 2023).

O funcionamento ocorre da seguinte forma: o ar atmosférico é admitido, em condição ambiente ou refrigerado, e direcionado ao compressor da máquina, onde passa por diversos estágios de compressão até atingir as condições ideais para seguir à câmara de combustão. Nessa etapa, o ar comprimido, que se aqueceu durante a compressão, é misturado ao combustível. A combustão gera gases em alta pressão e temperatura, que fluem para a seção de expansão da turbina, movimentando as pás e girando o eixo, o que converte a energia térmica em energia mecânica. Para a conversão em energia elétrica é conectado a este eixo um gerador (EPE, 2016).

Na figura 19 em sequência é possível um desenho esquemático do funcionamento de uma turbina a gás.

Figura 19: Esquema de Turbina a Gás



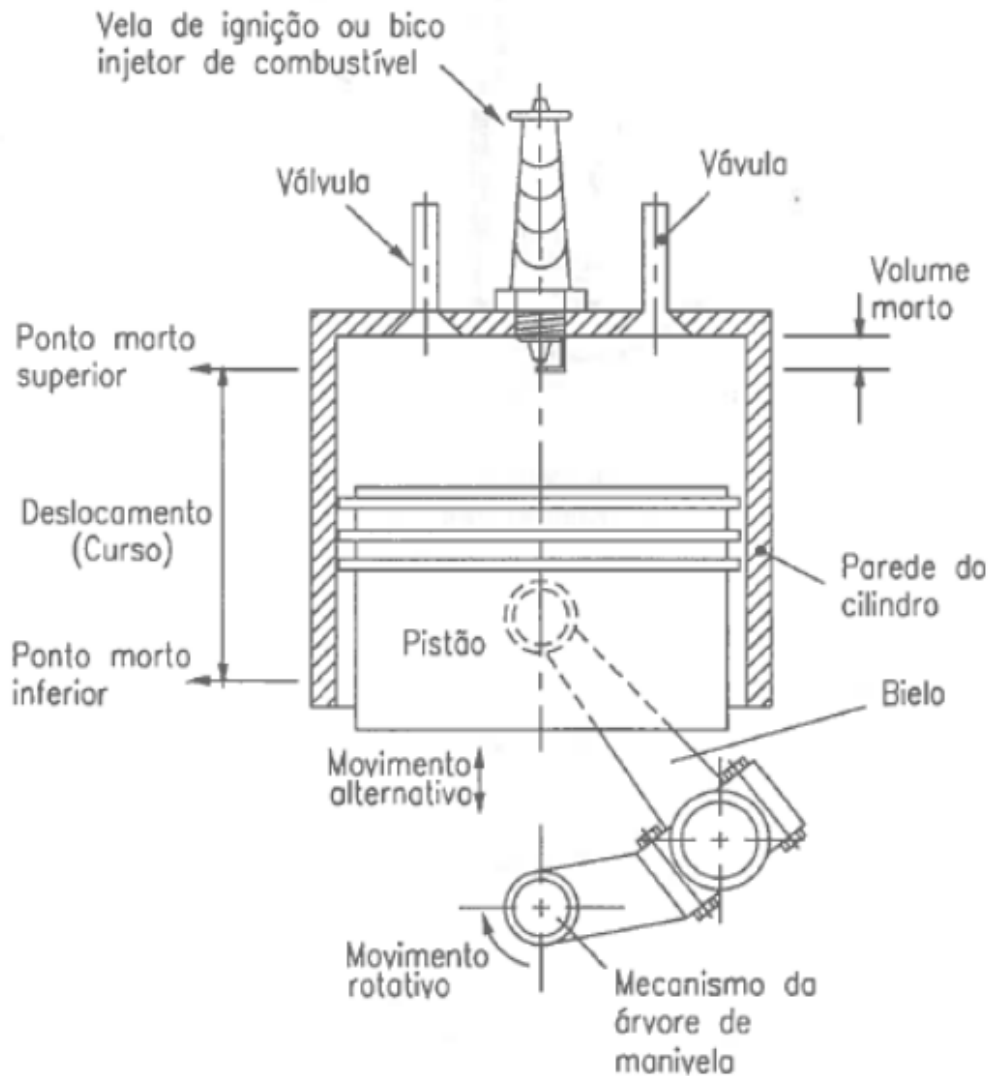
Fonte: EPE (2016)

Na configuração apresentada, pelo lado esquerdo da imagem observa-se a entrada do ar atmosférico, que é comprimido, encaminhado à câmara de combustão e depois utilizado para acionar as pás da turbina na parte de exaustão (EPE, 2016).

Assim como as turbinas, que realizam a mistura ar/combustível dentro da própria máquina para geração de energia, existem os motores de combustão interna, que utilizam pistões movimentados a partir da combustão realizada na câmara de combustão. Essa combustão pode ser iniciada por uma centelha produzida pela vela de ignição ou por compressão, quando há uma redução no volume do cilindro,

resultando em aumento de pressão e temperatura. Na figura 20 abaixo, é possível observar um desenho que representa um motor de ignição por centelha (EPE, 2016).

Figura 20: Esquema de Motor de Combustão Interna



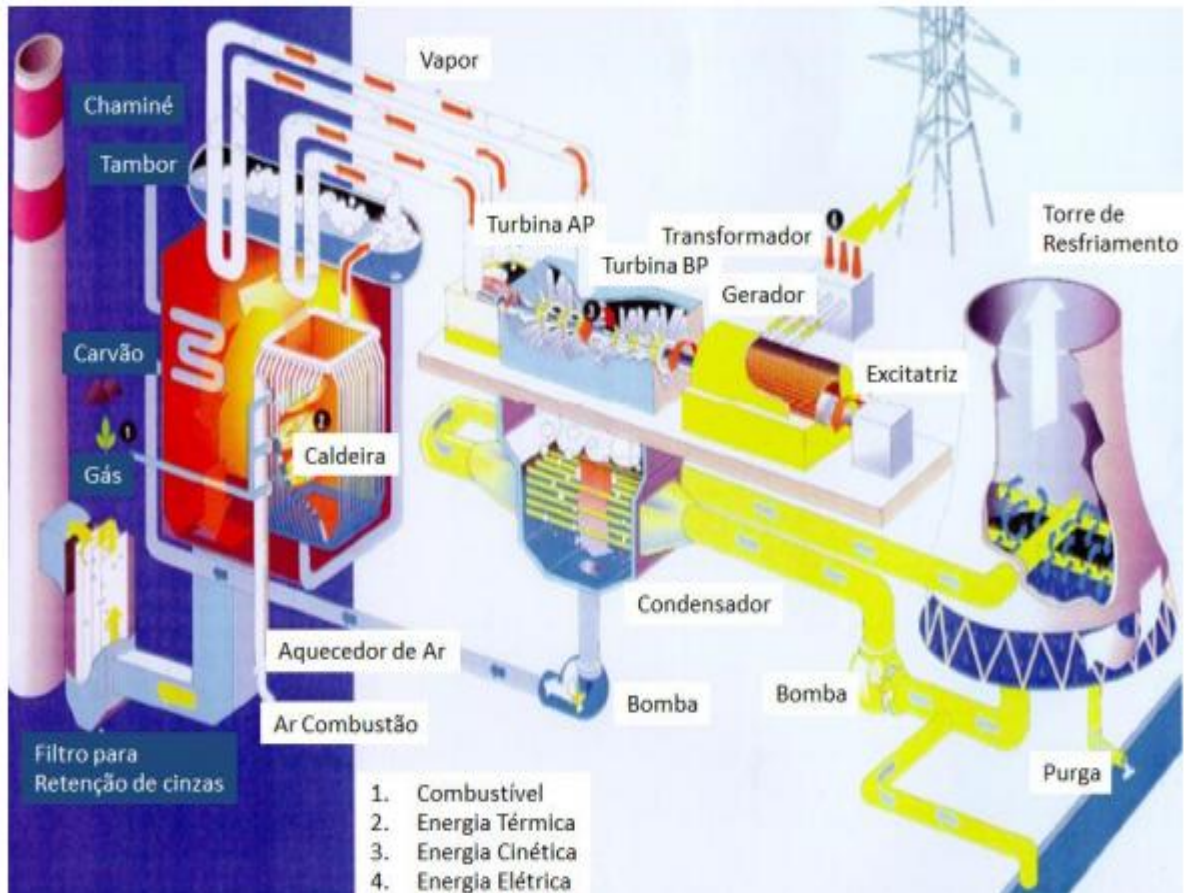
Fonte: EPE (2016)

No exemplo da figura 20, a câmara de combustão do motor recebe a mistura de ar e combustível, e a combustão é iniciada por uma centelha produzida pela vela. O pistão, então, realiza um movimento alternado para cima e para baixo, possibilitando a combustão contínua e conseqüentemente, a geração de energia (EPE, 2016).

Existem também as turbinas a vapor, que funcionam de forma totalmente diferente das turbinas a gás. Nesses equipamentos, a combustão não ocorre no interior da turbina, mas sim em caldeiras externas, onde são queimados combustíveis como óleo diesel, carvão, gás natural, biomassa, entre outros (EPE, 2016).

Nas caldeiras, o calor gerado pela queima do combustível é transferido para a água que circula dentro da caldeira por diversos tubos, que transformam a água em vapor devido à alta pressão e temperatura. Esse vapor é então direcionado para a turbina, e a pressão exercida sobre as pás faz com que elas girem, convertendo a energia térmica em energia mecânica. Na figura 21 abaixo, apresenta-se um esquema de geração termelétrica utilizando o carvão como combustível. (EPE, 2016).

Figura 21: Esquema de Usina Térmica de Carvão



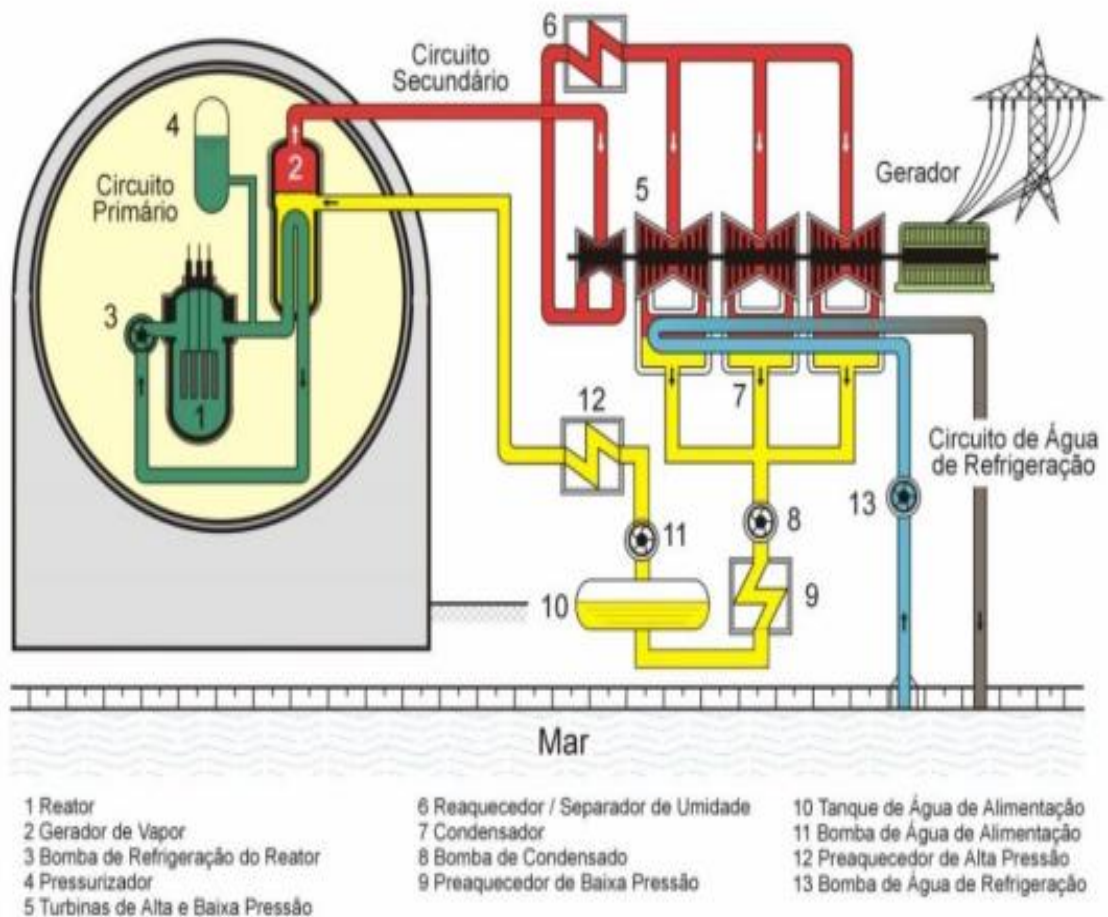
Fonte: EPE (2016)

Na extremidade esquerda da imagem observa-se a queima do carvão, cujo calor é direcionado para a caldeira. Nela, tubulações com água circulam em seu interior, realizando a troca de calor. Quando a água atinge a temperatura e pressão necessárias, o vapor gerado é transportado para a turbina, fazendo com que, em alta pressão, gire o eixo conectado ao gerador convertendo a energia mecânica do eixo em energia elétrica (EPE, 2016).

Semelhante a esse processo, temos as usinas nucleares, nas quais a água também é aquecida até se transformar em vapor em alta pressão, que será direcionado para uma turbina a vapor. A diferença está no processo de aquecimento:

ele ocorre por meio da fissão dos átomos de U-235. Quando esses átomos são bombardeados por nêutrons, inicia-se uma reação em cadeia que libera grande quantidade de energia térmica. Na figura 22, é possível conferir um esquema de uma usina nuclear (EPE, 2016).

Figura 22: Esquemático de uma Usina Nuclear



Fonte: EPE (2016)

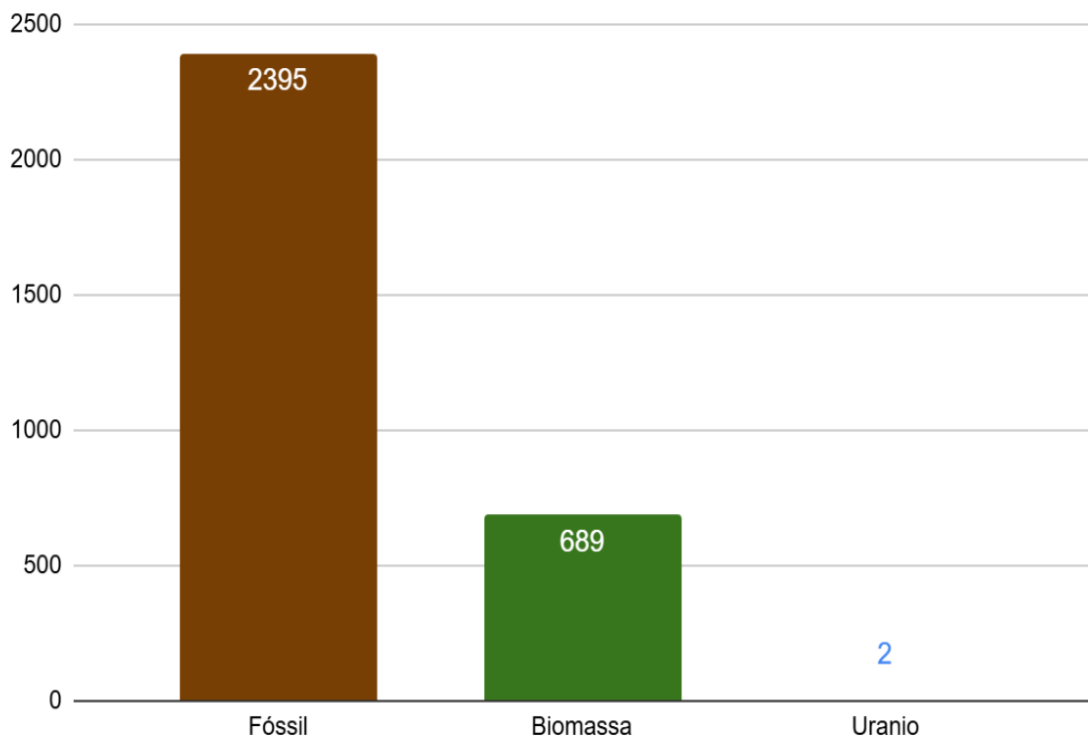
Observa-se que o reator, representado pelo número 1, é responsável por realizar a fissão nuclear. Esse reator está conectado ao sistema gerador de vapor (corresponde ao número 2), que por sua vez, envia o vapor para a turbina a vapor, permitindo que o sistema nuclear produza energia elétrica (EPE, 2016).

Portanto, neste capítulo foram abordadas as principais tecnologias utilizadas no mundo para a produção de energia elétrica a partir de diferentes fontes energéticas. Assim, na próxima seção será apresentada a situação brasileira das termelétricas, incluindo a capacidade instalada e as principais fontes utilizadas (EPE, 2016).

### 2.2.3 Capacidade instalada e geração de energia pelas termelétricas no Brasil

Na seção anterior foram abordadas as principais fontes de usinas termelétricas no Brasil e, no capítulo 1 da introdução, tem-se a Figura 1, que apresenta a divisão da matriz elétrica brasileira por fonte. Considerando apenas as porcentagens das usinas termelétricas, tanto renováveis quanto não renováveis, juntamente com as usinas nucleares, observa-se uma participação de aproximadamente 9,5% da matriz total. Além disso, deve-se somar a essa porcentagem a parcela correspondente às usinas termelétricas classificadas dentro autoprodução e geração distribuída, que englobam tanto fontes renováveis quanto não renováveis. Dessa forma, evidencia-se que as usinas termelétricas possuem uma participação significativa no suprimento da demanda elétrica brasileira, contribuindo de maneira estratégica para a segurança do sistema. Na figura 23 a seguir, apresenta-se um gráfico com a quantidade total de usinas termelétricas instaladas no Brasil. (EPE, 2024).

Figura 23: Gráfico com número de Termelétricas no Brasil



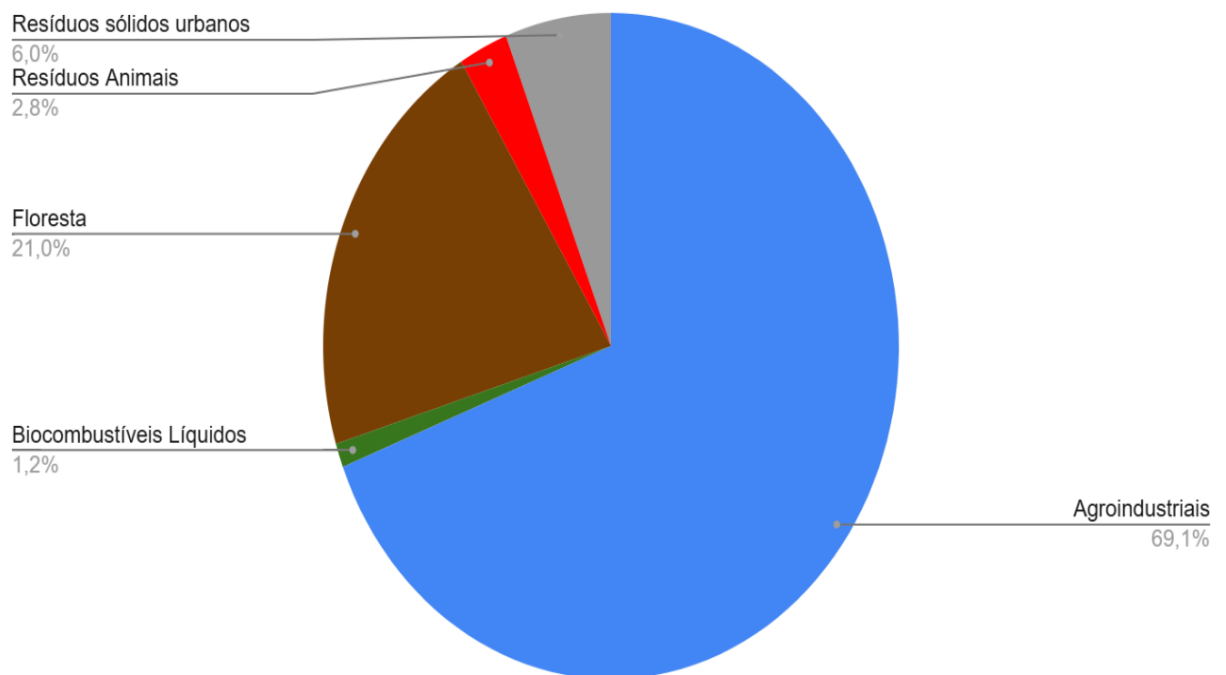
Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Conforme o gráfico apresentado, o Brasil, segundo dados do sistema SIGA da ANEEL, conta atualmente com 3.086 usinas termelétricas em operação. Desse total, 2.395 utilizam combustíveis fósseis, 689 operam a partir de biomassa e 2

correspondem a usinas nucleares. Juntas, essas usinas representam uma potência total outorgada de 56,3 GW, que corresponde à capacidade autorizada pelas licenças, e uma potência fiscalizada de 49,5 GW, referente à energia efetivamente disponibilizada aos consumidores (ANEEL,2025).

Sendo assim, abaixo tem-se a figura 22 que mostra a distribuição das usinas termelétricas a base de Biomassa, para analisar quais os combustíveis mais utilizados (ANEEL,2025).

Figura 24: Gráfico das termelétricas de biomassa

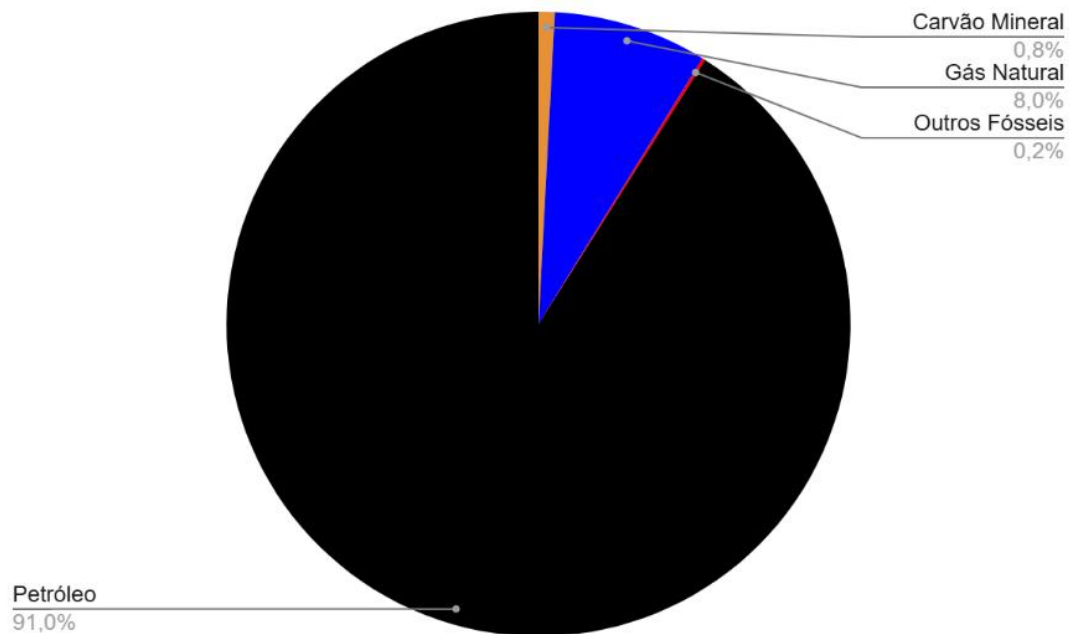


Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

Pela imagem acima, observa-se que 69,1% da geração de biomassa é proveniente de combustíveis agroindustriais, ou seja, materiais oriundos do agronegócio no Brasil. Na sequência, destacam-se a queima de madeira de reflorestamento, principalmente eucaliptos, que corresponde a 21%, os resíduos urbanos com 6%, os resíduos animais com 2,8% e, por fim, os biocombustíveis líquidos, representando 1,2%. Dessa forma, conclui-se que o agronegócio e as indústrias de papel e celulose são os principais responsáveis pela produção de energia elétrica em termelétricas a biomassa. Atualmente, a geração outorgada a partir da biomassa é de 23,8 GW, enquanto a geração fiscalizada está na ordem de 20,7 GW(ANEEL,2025).

Por outro lado, a queima de combustíveis fósseis em termelétricas representa uma geração outorgada de 30,6 GW e uma potência fiscalizada de 26,8 GW. Na figura 25 apresenta-se as diferentes fontes fósseis utilizadas no Brasil (ANEEL,2025).

Figura 25: Gráfico das termelétricas de combustível fóssil



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O petróleo atualmente ocupa uma posição expressiva, correspondendo a 91% da de usinas com geração proveniente de combustíveis fósseis, enquanto o gás natural representa 8%, o carvão mineral 0,8% e, por fim, outros combustíveis fósseis somam apenas 0,2% da matriz de termelétricas que utilizam fontes fósseis. Dessa forma, observa-se que a base das termelétricas fósseis no Brasil está fortemente concentrada no uso do petróleo (ANEEL,2025).

Portanto, foi possível analisar que, neste capítulo, o Brasil apresenta aproximadamente quatro vezes mais usinas movidas a combustíveis fósseis do que usinas a biomassa. Entretanto, quando se observa a diferença em termos de geração de energia, essa discrepância não é tão expressiva. Assim, constata-se que a matriz elétrica brasileira, mesmo no âmbito das usinas termelétricas, apresenta um caráter consideravelmente sustentável e, dessa maneira, no capítulo seguinte será analisado dentre as usinas termoelétricas, quais são os níveis de poluição e custos associados a cada fonte (ANEEL,2025).

### 2.3 IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DAS USINAS TERMELÉTRICAS

### 2.3.1 Comparação de custos construção, operação e manutenção de diferentes fontes de energia

Tratando do investimento em ativos de geração de energia, existem três pontos principais que são importantes de entender que englobam os custos totais relacionados a usinas de energia. O primeiro é o investimento relacionado à aquisição dos equipamentos necessários para o funcionamento da usina, às obras civis e a outros custos indispensáveis para o início da operação da planta, denominado CAPEX(EPE,2024).

O segundo ponto refere-se aos custos de Operação e Manutenção (O&M), que abrangem os gastos com a manutenção dos componentes da usina e a infraestrutura necessária para sua operação. Por fim, há o Custo Variável Unitário (CVU), composto pelo custo do combustível utilizado para operar a usina termelétrica e pelo custo de O&M variável, que varia de acordo com a quantidade de horas de funcionamento da planta (EPE, 2024).

Dessa maneira, abaixo tem a tabela 2, produzida com dados da Empresa de Pesquisa Energética que analisam os custos necessários para investir em usinas de energia no Brasil.

Tabela 2: Custo para Implantação de Usinas de Energia

Tipo de Oferta	Vida útil econômica (anos)	Faixas de CAPEX, mín e máx (R\$/kW)	CAPEX Referência, sem JDC (R\$/kW)	O&M (R\$/kW.ano)	Taxas, Encargos e Impostos (R\$/kW.ano)	Tempo médio de desembolso (meses)
Armazenamento - Baterias <sup>5</sup>	20	5.000 a 9.500	6.000 a 6.700	100 a 130	270 a 290	12
Biomassa - Bagaço de Cana	20	2.000 a 6.500	3.500 a 6.000	100	140 a 160	24
Biomassa - Cavaco de Madeira	20	3.500 a 8.500	7.500	160	180	36
Biogás - Resíduo sucroenergético <sup>6</sup>	20	3.000 a 12.000	10.000	600	230	24
RSU - Incineração <sup>7</sup>	20	20.000 a 36.500	27.000	1.100	980	36
Carvão Nacional	25	8.000 a 16.000	13.000	260	790	48
Eólica Offshore	20	10.500 a 25.000	15.000	360	550	36
Eólica Onshore	20	4.000 a 7.500	4.300 a 6.200	110	150 a 170	24
Solar Fotovoltaica	25	3.000 a 6.000	3.300 a 5.000	60	130 a 150	12

Continua

Tabela 3: Custo para Implantação de Usinas de Energia Conclusão

Fotovoltaica Flutuante	25	4.000 a 8.500	6.000	80	160	12
Gás Natural - Ciclo Combinado	20	3.500 a 7.000	4.800 a 6.400 <sup>9</sup>	200 <sup>9</sup> a 710 <sup>8</sup>	320 a 330	36
GNL - Ciclo Combinado	20	3.500 a 6.000	5.100 <sup>10</sup>	200 <sup>10</sup>	280	36
GNL - Ciclo Simples	20	3.000 a 5.000	4.500	200	250	24
Nuclear	30	20.000 a 40.000	30.000	650	730	60
PCH	30	5.000 a 13.500	7.000 a 12.000	60	140 a 180	30
Reversíveis	30	6.000 a 15.000	7.800	80	380	36

Fonte: Adaptado de EPE (2024)

Observa-se que a primeira coluna está relacionada à vida útil econômica, com dados avaliados a partir da durabilidade de cada equipamento e do tempo de validade de cada licença de operação. Em geral, os ativos possuem vida útil econômica superior a 30 anos, o que proporciona um retorno financeiro significativo. O CAPEX é um custo que varia bastante de acordo com a fonte de geração e o porte da planta, já que cada tecnologia exige diferentes volumes de obras civis, tornando o investimento inicial distinto entre elas (EPE, 2024).

Do ponto de vista de custos necessários para o funcionamento contínuo da planta, as fontes renováveis apresentam custos de O&M e de impostos consideravelmente inferiores aos observados em usinas termelétricas. Para ilustrar, comparemos uma usina fotovoltaica e uma usina de GNL em ciclo simples, ambas com capacidade de 100 MW. A usina fotovoltaica demanda R\$ 6.000.000 anuais para O&M e R\$ 14.000.000 para impostos, totalizando R\$ 20.000.000 por ano. Já a usina de GNL de ciclo simples apresenta R\$ 20.000.000 anuais para O&M e R\$ 25.000.000 para impostos, totalizando R\$ 45.000.000 anuais (EPE, 2024).

Essa comparação mostra que, apenas em O&M e impostos, uma usina termelétrica custa mais que o dobro de uma usina solar. Isso demonstra que, apesar de fundamentais para garantir a segurança do sistema elétrico na ausência de fontes renováveis, as termelétricas não são economicamente viáveis para operação contínua ao longo do ano devido ao seu alto custo (EPE, 2024).

Além disso, no cálculo apresentado acima, a geração termelétrica ainda possui um custo adicional referente ao combustível, representado pelo Custo Variável

Unitário (CVU), o que encarece ainda mais a operação. A seguir, será apresentada a tabela 3 com a estimativa desses custos (EPE, 2024).

Tabela 4: Custo do Combustível em Usinas Termelétricas

Tipo de Oferta	Inflexibilidade Operativa	Preço do gás na UTE (US\$/MMBTU)	CVU (R\$/MWh)
GNL - Ciclo Combinado	0% a 50% (sazonal)	10,8 a 11,7	520 a 560
GNL - Ciclo Simples	0%	11,7	730
Gás Natural	70% (sazonal) a 100% (flat)	5,0 a 6,0	260 a 300
Biomassa - Cavaco de Madeira	-	-	250
Carvão Nacional	-	-	180
Nuclear	-	-	50

Fonte: Adaptado de EPE (2024)

Portanto, a imagem acima apresenta uma estimativa dos custos do Custo Variável Unitário (CVU) de diferentes tipos de fontes de calor utilizadas em usinas termelétricas e confere-se que usinas utilizando Gás Natural tem uma variação dependendo do seu regime de operação. Porém, o de custo no mínimo de combustível para uma usina seria de R\$260/ MWh. Dessa forma, observa-se que a operação dessas usinas envolve custos elevados, os quais acabam sendo repassados ao consumidor final. Além disso, outro ponto que deve ser destacado é a respeito das emissões das termelétricas, que será discutido na sequência (EPE, 2024).

### 2.3.2 Emissões de gases de efeito estufa em usinas termelétricas

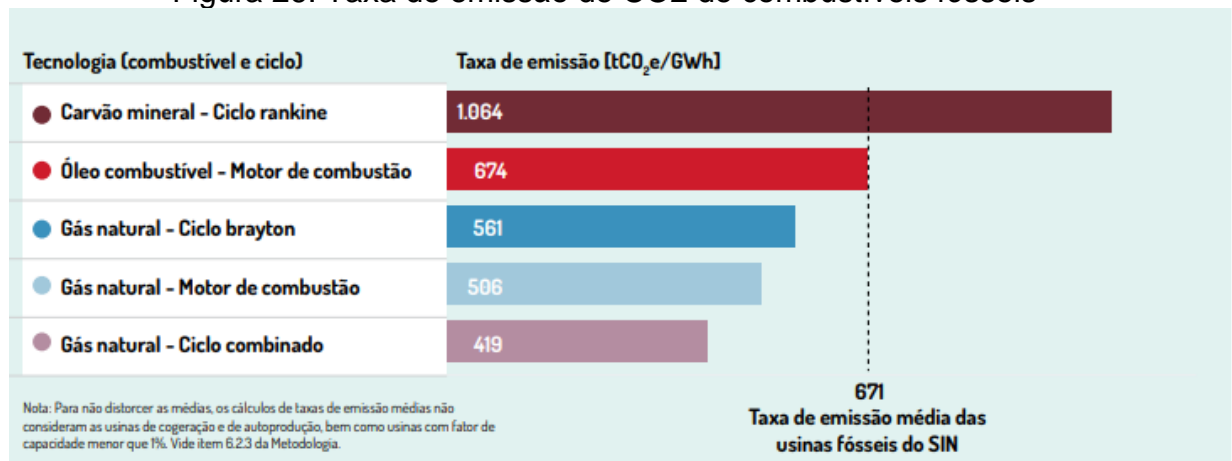
O processo de geração em usinas termelétricas ocorre a partir da queima de combustíveis, transformando a energia térmica em trabalho mecânico. No entanto, esse processo de combustão resulta na emissão de diversos poluentes, que variam de acordo com o tipo de combustível utilizado, seja ele de origem fóssil ou de biomassa. O que é importante ressaltar é que, no caso da biomassa, como citado no capítulo 2.2 sobre Usinas Termelétricas, ela é considerada uma fonte de “carbono neutro”, em razão do balanço de emissões de CO<sub>2</sub>(EPE,2016).

Durante a combustão, podem ser liberados gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal responsável pelo efeito estufa; material particulado (MP), constituído por partículas sólidas e líquidas de pequenas dimensões que permanecem em suspensão na atmosfera; óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), que reagem no ar atmosférico e contribuem para a formação da chuva ácida. Além

desses, também podem ser emitidos poluentes como o monóxido de carbono (CO) e metais pesados, que provocam reações adversas no meio ambiente e podem comprometer a saúde humana (IEMA,2016).

Considerando os diferentes combustíveis utilizados, observa-se que o carvão mineral é o que apresenta maiores níveis de emissão, liberando grandes quantidades de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, MP e CO<sub>2</sub>. O óleo diesel, embora menos poluente que o carvão, também emite esses mesmos compostos em quantidades ainda relevantes. Já o gás natural destaca-se por ser o combustível fóssil menos poluente, uma vez que sua queima resulta predominantemente na emissão de NO<sub>x</sub> em níveis significativos, enquanto os demais poluentes aparecem em concentrações mais reduzidas. Na imagem a seguir tem um gráfico com a Taxa de emissão em tCO<sub>2</sub>/GWh dividida por combustíveis fósseis (IEMA,2016).

Figura 26: Taxa de emissão de CO<sub>2</sub> de combustíveis fósseis



Fonte: IEMA (2024)

Com isso, observando a taxa de emissão, comprova-se que o carvão mineral é o combustível fóssil mais poluente, emitindo aproximadamente o dobro do que o gás natural. Porém, quando se observa a comparação entre gás natural e óleo combustível, a diferença na emissão de CO<sub>2</sub> é menor, estando a principal distinção nas demais substâncias liberadas durante a combustão (IEMA,2024).

Portanto, é possível analisar que o Brasil possui uma base expressiva de usinas termelétricas, o que, por um lado, é positivo para a segurança elétrica, porém, por outro, como foi explorado anteriormente, apresenta um custo elevado. Além disso, as usinas que utilizam combustíveis fósseis possuem níveis significativos de emissão. Sendo assim, é interessante que as termelétricas sejam utilizadas como apoio em

momentos em que as fontes renováveis não conseguem suprir a demanda (IEMA,2024).

### **3 METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento deste Trabalho de Graduação quanto a sua natureza, ele pode ser classificado como Pesquisa Aplicada, isso se justifica, pois, a investigação aborda um problema prático sobre a necessidade de garantir a segurança e estabilidade do Sistema Interligado Nacional diante da crescente inserção de fontes renováveis intermitentes. Assim, o estudo visa gerar subsídios para a compreensão e solução deste desafio setorial. (NASCIMENTO, 2016).

Quanto ao objetivo, o trabalho adota um caráter Explicativo. A pesquisa não se limita a descrever a matriz elétrica, mas busca ativamente identificar e aprofundar as relações de causa e efeito entre a intermitência das fontes eólica e solar, a variabilidade hidrológica e o papel estratégico das usinas termelétricas como ferramentas de flexibilidade e confiabilidade para o sistema (GIL, 2002).

O meio para o desenvolvimento do trabalho foi a Revisão Integrativa da Literatura. Este método, que se insere no escopo da pesquisa bibliográfica, foi escolhido por sua capacidade de sintetizar e analisar criticamente uma gama diversificada de fontes. Foram consultados artigos científicos, teses, dissertações, bem como literatura técnica e regulatória de órgãos setoriais chave (como ONS, EPE e ANEEL) e relatórios de associações da indústria. Esta abordagem permitiu combinar dados teóricos e práticos para construir um panorama abrangente sobre o tema (UNESP, 2015).

Por fim, este trabalho terá uma abordagem Qualitativa, pois a pesquisa não se concentrou na quantificação estatística de dados, mas sim na interpretação de conteúdo. A análise qualitativa permitiu examinar as diversas perspectivas e pontos de vista, incluindo os aspectos técnico, econômico e ambiental que permeiam o debate, possibilitando uma compreensão aprofundada da complexidade do papel das termelétricas na transição elétrica brasileira. (GODOY, 1995).

Para complementar a etapa de análise de resultados e discussões, foi empregada a ferramenta Análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats), também conhecida como Matriz FOFA (Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças). Essa metodologia foi utilizada para avaliar, de forma estruturada, os fatores internos e externos que influenciam o desempenho do setor termelétrico no

contexto da segurança elétrica nacional. A escolha dessa ferramenta justifica-se pela sua ampla aplicação em estudos de planejamento estratégico e diagnóstico organizacional, inclusive em áreas técnicas e de engenharia, possibilitando uma visão holística dos cenários analisados (DAMASCENO; ABREU, 2018).

Além disso, a utilização da Análise SWOT é coerente com a natureza qualitativa da pesquisa, permitindo identificar os pontos fortes e fracos relacionados à operação das usinas termelétricas, bem como as oportunidades e ameaças provenientes do ambiente externo. Essa abordagem é frequentemente adotada em estudos de engenharia, pois contribui para a formulação de estratégias que visam à melhoria da eficiência operacional e à mitigação de riscos. (SACCO; SANTOS; BRITO, 2021).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 COMO O BRASIL PODE ENFRENTAR OS DESAFIOS DA TRANSIÇÃO ELÉTRICA**

#### **4.1.1 Contribuição das Termelétricas para a Segurança Elétrica do Brasil**

O Sistema Interligado Nacional (SIN) vem passando por um processo de modernização contínua, caracterizado pela crescente incorporação de fontes renováveis à matriz elétrica brasileira. Contudo, as chamadas Fontes Renováveis Não Despacháveis (FRND) apresentam limitações inerentes à sua dependência das condições naturais. Essa intermitência representa um desafio para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável por assegurar a estabilidade e a confiabilidade do suprimento energético nacional (CUNHA; SOARES; SILVA, 2018; EPE, 2024).

Conforme apontam Petinrin e Shaaban (2016), a expansão dessas fontes não controláveis pode ocasionar o fenômeno de fluxo reverso na rede, isto é, a inversão da direção do fluxo de energia em relação ao sentido tradicional, o que tende a provocar elevações indesejadas de tensão e potenciais danos aos equipamentos conectados ao sistema. Diante desse cenário, evidencia-se a importância das usinas termelétricas como elementos estratégicos para o equilíbrio do SIN, uma vez que se configuram como fontes de energia despacháveis, capazes de entrar em operação sob demanda e em qualquer momento em que a rede necessite de suporte adicional.

Essa característica torna as termelétricas fundamentais para a manutenção da segurança elétrica, pois garantem a continuidade do fornecimento mesmo em períodos de baixa geração hidráulica, eólica ou solar. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), a projeção para 2034 indica que 81,8% da capacidade instalada brasileira será composta por fontes renováveis. Tal proporção reforça a dependência do país em relação a fontes intermitentes e, conseqüentemente, a necessidade de uma base de usinas termelétricas moderna, eficiente e estrategicamente distribuída para assegurar a estabilidade operacional do SIN.

Em síntese, os resultados apontam que, embora o Brasil mantenha uma matriz predominantemente renovável, as termelétricas permanecem como pilares estruturais

da segurança elétrica nacional, garantindo a flexibilidade operacional indispensável para o equilíbrio entre oferta e demanda.

#### 4.1.2 O Papel Crucial das Termelétricas em Cenários de Escassez Hídrica

A contribuição das usinas termelétricas torna-se ainda mais evidente em contextos de escassez hídrica, quando a principal fonte de geração elétrica brasileira, a hidrelétrica, enfrenta limitações de operação. Atualmente, segundo a Empresa de Pesquisa Energética, 2024, 55,8% da energia nacional é proveniente da hidroeletricidade.

Historicamente, o sistema hídrico brasileiro foi estruturado com grandes reservatórios, que funcionam como baterias capazes de regularizar a oferta e compensar a variabilidade das chuvas. No entanto, como demonstrado pela CNI (2018), a energia armazenada nos reservatórios tem apresentado tendência de declínio ao longo dos anos, indicando redução da capacidade de armazenamento e de regulação do sistema.

Esse processo de deplecionamento é agravado pela dificuldade de implantação de novos empreendimentos hidrelétricos com reservatórios, assim, estima-se que cerca de 77% do potencial inventariado para a construção de novas usinas esteja localizado em áreas legalmente protegidas, o que impõe restrições socioambientais significativas (EPE, 2018). Dessa forma, a expansão recente do setor hídrico tem se concentrado em usinas a fio d'água, que, embora apresentem menor impacto ambiental, não oferecem capacidade de armazenamento.

Nesse cenário, confiar exclusivamente na geração hidrelétrica torna-se uma estratégia de risco, já que a ausência de capacidade de armazenamento e a crescente imprevisibilidade climática comprometem a segurança de suprimento do SIN. Assim, as usinas termelétricas consolidam-se como a principal fonte de reserva operativa capaz de atuar de forma imediata em períodos de estiagem, restabelecendo a confiabilidade do sistema elétrico nacional.

Além disso, o acionamento termelétrico, apesar de representar custos adicionais, tem se mostrado indispensável em situações críticas de oferta, servindo como um instrumento de mitigação dos riscos. Dessa maneira, sua rápida resposta operacional permite que o ONS preserve o equilíbrio entre geração e consumo, evitando interrupções no fornecimento e contribuindo diretamente para a estabilidade econômica e elétrica do país.

#### 4.1.3 As usinas termelétricas podem atuar como alternativas sustentáveis para geração de energia elétrica

Embora a contribuição das usinas termelétricas para a segurança do SIN seja inquestionável, o principal desafio para a ampliação de sua utilização no sistema elétrico brasileiro reside nos impactos ambientais, especialmente no que se refere às emissões atmosféricas de poluentes resultantes da geração térmica (IEMA, 2016).

Usinas movidas a combustíveis fósseis e carvão são as grandes responsáveis pela má reputação ambiental desse tipo de geração de energia elétrica, pois, conforme demonstram Viscondi, Silva e Cunha (2016) na análise apresentada na Figura 25, o carvão mineral e o óleo diesel são as fontes que mais emitem CO<sub>2</sub> e outros poluentes tóxicos. Por outro lado, as usinas movidas a gás natural representam uma ótima alternativa para a substituição desses combustíveis, já que o gás natural é uma fonte que emite menores quantidades de CO<sub>2</sub> e apresenta níveis significativamente reduzidos de outros poluentes, configurando-se como uma opção mais sustentável.

Nessa mesma linha, a alternativa termelétrica considerada mais sustentável é a utilização da biomassa, uma vez que ela é classificada como carbono neutro. No cenário brasileiro, o país é extremamente privilegiado, pois, conforme mostrado na Figura 16, o nível de produção de biomassa por hectare é superior ao do restante do mundo. Isso evidencia o potencial do Brasil para se consolidar como líder na utilização de energia termelétrica com baixo impacto ambiental, contribuindo para a sustentabilidade e reduzindo a imagem negativa associada ao setor.

Juntamente com a biomassa, outra fonte termelétrica de geração de base que não emite gases de efeito estufa é a geração nuclear. Conforme apontado pelo Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL/UFRJ, 2022), a energia vinda do urânio resolve o paradoxo central discutido neste trabalho de uma fonte facilmente despachável e, ao mesmo tempo, livre de emissões de carbono (atendendo à pressão ambiental)

Dessa forma, a renovação do parque termelétrico brasileiro, com foco em gás natural, biomassa e urânio, deve ser incentivada e expandida, já que ambos os combustíveis estão disponíveis em território nacional para suprir a demanda elétrica. Essa estratégia permite que o Brasil mantenha seu destaque na geração sustentável de energia elétrica, garantindo que, além das fontes renováveis, as termelétricas essenciais para a segurança do sistema também sejam ambientalmente responsáveis.

## 4.2 ANÁLISE ESTRATÉGICA (SWOT) DAS USINAS TERMELÉTRICAS

### 4.2.1 Apresentação dos pontos discutidos na Matriz SWOT

Após a análise da contribuição das usinas termelétricas para a segurança elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), aplicou-se a ferramenta de análise SWOT Abreviação de Strengths (Forças), Weaknesses (Fraquezas), Opportunities (Oportunidades) e Threats (Ameaças). Essa metodologia permite compreender de forma sistematizada os benefícios e limitações das usinas termelétricas no contexto elétrico brasileiro, sintetizando os fatores internos e externos que influenciam seu desempenho e relevância estratégica. A Figura 27 apresenta o esquema utilizado para a elaboração dessa análise.

Figura 27: Análise SWOT para Usinas Termelétricas



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O primeiro grupo de fatores corresponde às forças das usinas termelétricas. Conforme destacam Lawson e Pereira (2017), entre os principais pontos positivos, destaca-se a flexibilidade operacional, visto que essas unidades podem ser acionadas sob demanda pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para garantir a continuidade do fornecimento de energia. Outro aspecto relevante é a independência de fatores climáticos, uma vez que as termelétricas não dependem de regimes de chuva, ventos ou irradiação solar para operar, seu funcionamento depende apenas da disponibilidade do combustível, o que assegura sua operação em qualquer condição

meteorológica. Além disso, as usinas termelétricas possuem flexibilidade locacional, já que independem de fatores geográficos para sua implantação.

No que se refere às fraquezas, o principal desafio está relacionado ao alto custo operacional, influenciado pelo preço variável dos combustíveis, conforme detalhado nos parâmetros de custo do Plano Decenal (EPE, 2024). Enquanto nas fontes renováveis o custo está concentrado em investimentos de capital (CAPEX) e operação (OPEX) da planta, nas termelétricas há o acréscimo do custo do combustível, que pode variar conforme o mercado internacional. Outro ponto crítico refere-se à dependência de combustíveis altamente poluentes, como o óleo diesel e o carvão mineral, ainda presentes em parte significativos do parque termelétrico nacional. Segundo dados da ANEEL (2025), o Brasil possui 2.395 usinas termelétricas a combustíveis fósseis, sendo aproximadamente 91% movidas a óleo diesel e 0,8% a carvão mineral. Essa configuração evidencia que grande parte do parque existente é antigo e necessita de modernização tecnológica e substituição por alternativas menos emissoras, como o gás natural e a biomassa (IEMA, 2016).

Em relação às oportunidades, observa-se um cenário favorável à ampliação da participação das termelétricas como elementos complementares à geração renovável. O crescimento acelerado das Fontes Renováveis Não Despacháveis (FRND), como solar e eólica, aumenta a necessidade de fontes de suporte despacháveis, capazes de garantir a continuidade do fornecimento em períodos de baixa produção renovável. Além disso, segundo a EPE (2018), diante das dificuldades para expansão de novas hidrelétricas com reservatórios, limitadas por restrições socioambientais e geográficas, as termelétricas ganham destaque como alternativas de segurança elétrica. Soma-se a esse contexto o grande potencial brasileiro para o uso da biomassa, considerada uma fonte de carbono neutro. Segundo a EPE (2016), a biomassa apresenta elevada produtividade no país e pode ser amplamente utilizada para a geração termelétrica sustentável, contribuindo para a descarbonização do setor e para a diversificação da matriz elétrica.

Por fim, as ameaças ao setor termelétrico concentram-se principalmente na pressão global pela descarbonização e na percepção negativa associada às emissões de gases de efeito estufa, que foram quantificados pelo IEMA (2016), mostrando a dimensão destas consequências. Nesse contexto, é essencial destacar que as usinas termelétricas não devem ser vistas como um obstáculo à transição elétrica, mas sim como instrumentos de suporte que asseguram uma transição elétrica gradual e

segura. Outra ameaça relevante é a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis, que dependem fortemente do mercado internacional. Essa variabilidade pode comprometer a previsibilidade de custos e afetar a competitividade das termelétricas, especialmente em cenários de alta dos preços do petróleo.

#### 4.2.2 Síntese dos resultados da matriz SWOT

A análise SWOT permitiu consolidar os principais aspectos estratégicos das usinas termelétricas no contexto da segurança elétrica brasileira. De modo geral, observou-se que as termelétricas mantêm papel essencial na estabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), atuando como fontes de suporte em momentos de baixa geração renovável ou escassez hídrica. A flexibilidade operacional e a independência climática destacam-se como suas maiores vantagens, assegurando confiabilidade e previsibilidade à operação do sistema elétrico (EPE, 2024; CUNHA; SOARES; SILVA, 2018).

Por outro lado, a análise evidenciou desafios significativos relacionados ao alto custo de operação e às emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis, o que reforça a necessidade de modernização tecnológica e diversificação da matriz térmica. Nesse sentido, as oportunidades associadas à ampliação do uso do gás natural e da biomassa, bem como ao avanço de tecnologias de baixo carbono, apontam caminhos viáveis para alinhar segurança elétrica e sustentabilidade (IEMA, 2016)

Em síntese, os resultados indicam que as usinas termelétricas não devem ser vistas como obstáculos à transição elétrica, mas como elementos estratégicos de suporte. O futuro do setor depende da capacidade de adaptação dessas usinas às novas exigências ambientais e econômicas, consolidando-as como uma ponte entre a matriz atual e um sistema elétrico mais limpo, seguro e resiliente.

### 4.3 O DESEQUILÍBRIO DO PARQUE TERMELÉTRICO ATUAL E DIREÇÕES FUTURAS

#### 4.3.1 Diagnóstico da Matriz Termelétrica: A Dominância de combustíveis fósseis

A Figura 21 produzida a partir dos dados da ANEEL (2025), demonstra uma dominância numérica esmagadora de usinas movidas a combustíveis fósseis quando comparadas com as usinas de Biomassa e Nucleares. Conforme analisado, tem-se

que o Brasil detém 3086 Usinas termelétricas, sendo 2395 Termelétricas movidas a combustíveis fósseis, 689 movidas a biomassa e 2 Usinas Nucleares. Essa disparidade evidencia um desequilíbrio estrutural na composição do parque termelétrico nacional, que permanece fortemente dependente de fontes não renováveis, em contraste com a tendência de sustentabilidade.

O aprofundamento da análise desses 2.395 empreendimentos fósseis revela um problema ainda mais crítico: o parque termelétrico brasileiro é, em grande parte, obsoleto. Com base nos mesmos dados da ANEEL (2025), identifica-se que aproximadamente 91% dessas usinas são movidas a óleo diesel e 0,8% a carvão mineral. Esta concentração em combustíveis de alto custo e elevado impacto ambiental é a principal fonte dos desafios do setor.

Conforme Viscondi, Silva e Cunha (2016) e os estudos do IEMA (2016), o diesel e o carvão são os combustíveis com maiores índices de emissão de CO<sub>2</sub> e outros poluentes tóxicos. Além do grave impacto ambiental, essa dependência reflete diretamente nos custos de operação, como apontado nos parâmetros da EPE (2024), tornando o despacho dessa capacidade instalada extremamente caro para o sistema.

Portanto, o diagnóstico da matriz termelétrica apresenta uma dominância fóssil, mas evidencia que essa dominância é composta por custos altos de despacho e altos níveis de poluição, justificando a urgência de uma modernização estratégica.

#### 4.3.2 Direcionamentos Estratégicos e Perspectivas Futuras

Nesse cenário, a modernização do parque termelétrico brasileiro depende de investimentos em eficiência e inovação. Assim, a diversificação das fontes e a atualização tecnológica tornam-se fundamentais para consolidar um sistema elétrico mais limpo, confiável e alinhado aos objetivos de sustentabilidade do setor energético nacional.

Este direcionamento estratégico materializa-se na substituição do parque obsoleto a óleo diesel e carvão por usinas a Gás Natural, cuja tecnologia de turbina flexível, conforme aponta Molière (2023), é apta para suportar a intermitência das FRND com menor impacto ambiental. Paralelamente, é fundamental fomentar a expansão da termelétrica renovável, notadamente a Biomassa, que possui vasto potencial nacional, e investir na geração de base limpa, como a Nuclear, identificada pelo GESEL/UFRJ (2022) como pilar de segurança despachável e livre de carbono.

Portanto, a perspectiva futura não é a de um sistema sem termelétricas, mas sim a de um sistema com termelétricas mais limpas. A execução desses direcionamentos é o que permitirá ao SIN atingir os objetivos de longo prazo traçados, garantindo a segurança do suprimento em um cenário de crescente descarbonização.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o papel das usinas termelétricas na segurança do Sistema Interligado Nacional e concluiu que elas são elementos estratégicos e indispensáveis. O objetivo principal foi atingido, demonstrando que frente à expansão de fontes renováveis não despacháveis e à redução da capacidade de armazenamento hídrico, as termelétricas fornecem a flexibilidade operacional e a garantia de entrega de energia elétrica essenciais para garantir a estabilidade do sistema.

A pesquisa identificou um desequilíbrio no parque térmico nacional, marcado pela dominância de usinas a Diesel, no qual isso cria um paradoxo onde a segurança elétrica é mantida ao custo de elevados impactos tarifários e ambientais.

Portanto, este estudo aponta que o caminho para uma transição elétrica segura não envolve a eliminação das termelétricas, mas sim no uso de fontes de energia menos poluentes. Sendo assim, a solução reside na substituição estratégica de usinas antigas por tecnologias mais limpas e eficientes, como o Gás Natural, Biomassa e a energia nuclear.

## REFERÊNCIAS

ACCO, R. L.; SANTOS, E. M.; BRITO, T. L. F. **Análise comparativa, via matriz SWOT, de fontes energéticas gasosas na região Sul do Brasil.** In: CONGRESSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS E ENERGIA – CONEPETRO, 2021.

Disponível em:

[https://editorarealize.com.br/editora/anais/conepetro/2021/TRABALHO\\_EV147\\_MD1\\_SA5\\_ID579\\_23042021200029.pdf](https://editorarealize.com.br/editora/anais/conepetro/2021/TRABALHO_EV147_MD1_SA5_ID579_23042021200029.pdf). Acesso em: 8 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA – Sistema de informações de geração da ANEEL:** siga-empresendimentos-geracao.csv [arquivo CSV]. Versão 1.1, atualização em 1 ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Boletim anual 2025.** São Paulo: ABEEólica, 2025. Disponível em:

[https://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2025/05/424\\_ABEEOLICA\\_BOLETIM-ANUAL-2025\\_PT\\_Final-Aprovado.pdf](https://abeeolica.org.br/wpcontent/uploads/2025/05/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2025_PT_Final-Aprovado.pdf). Acesso em: 6 maio 2025.

BARBOSA, K. S.; FERNANDEZ, R. N.; GONÇALVES, M. T. **Avaliando aspectos regulatórios da inserção de termelétricas na base do setor elétrico brasileiro por meio da teoria de contratos.** Brasília, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/207389c5-7d8a-4286-9f0b-a99ed7fefbe0>. Acesso em: 15 abr. 2025.

BEZERRA, F. D. **Energia eólica.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil – Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE), 2023. Disponível em:

<https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2658>. Acesso em: 7 set. 2025.

BURSZTYN, M.; BERMANN, C. **A grande aceleração e a construção de hidrelétricas no Brasil.** Revista Estudos Avançados, São Paulo, 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/vh/a/ChCpxyx8Xg6w74xRTmNBRvJ/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 25 jun. 2025.

CASTRO, N.; LEAL, L. M.; VERDE, I. **O Brasil e o mercado mundial de urânio.**

Rio de Janeiro: Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL/UFRJ), 2022.

Disponível em: [https://gesel.ie.ufrj.br/wp-](https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/12/Castro_2022_12_02-1.pdf)

[content/uploads/2022/12/Castro\\_2022\\_12\\_02-1.pdf](https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/12/Castro_2022_12_02-1.pdf). Acesso em: 3 ago. 2025.

CIANCIARULLO, M. I. **Termelétricas e a base do sistema energético no Brasil.**

Rio de Janeiro: Gesel, 2021. Disponível em:

[https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/46\\_cianciarullo\\_2021\\_02\\_22.pdf](https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/46_cianciarullo_2021_02_22.pdf).

Acesso em: 27 mar. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Térmicas na base: a escolha inevitável.** Brasília: CNI, 2018. Disponível em:

[https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/be/50/be501592-341c-46b8-a624-644d1600eedc/termicas\\_na\\_base\\_web.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/be/50/be501592-341c-46b8-a624-644d1600eedc/termicas_na_base_web.pdf). Acesso em: 3 abr. 2025.

COSMO, B. M. N.; GALERIANI, T. M.; NOVAKOSKI, F. P.; RICINI, B. M. Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, Botucatu, 2020. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/laboratoriodematologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202001.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.

CUNHA, K. B.; SOARES, M.; SILVA, A. F. **A termelétricidade no novo contexto do setor elétrico**: a importância da avaliação de impactos ambientais. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA, 2018. Disponível em: [https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2018/01/nota-tecnica-a-termelétricidade-no-novo\\_contexto-do-setor-eletrico\\_1.pdf](https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2018/01/nota-tecnica-a-termelétricidade-no-novo_contexto-do-setor-eletrico_1.pdf). Acesso em: 27 mar. 2025.

DAMASCENO, V. S.; ABREU, Y. V. de. Avaliação da energia eólica no Brasil utilizando a análise SWOT e PESTEL. **Revista Interações**, v. 19, n. 3, p. 637–650, 2018. Disponível em: [https://www.interacoes.ucdb.br/interacoes/article/download/1649/pdf\\_1](https://www.interacoes.ucdb.br/interacoes/article/download/1649/pdf_1). Acesso em: 8 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2025**: síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN\\_Síntese\\_2025\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_Síntese_2025_PT.pdf). Acesso em: 8 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Energia termelétrica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termelétrica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Notas sobre a inserção de hidrogênio e biomassa no horizonte do Plano Nacional de Energia 2050**: nota técnica EPE-DPG-SDB-2025/02. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-891/NT-EPE-DPG-SDB-2025-02\\_H2%20e%20biomassa.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-891/NT-EPE-DPG-SDB-2025-02_H2%20e%20biomassa.pdf). Acesso em: 27 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão**: Plano Decenal de Expansão de Energia 2034. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico709/Caderno%20de%20Custos%20Geração%20e%20Transmissão\\_PDE 2034\\_2024.09.06.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico709/Caderno%20de%20Custos%20Geração%20e%20Transmissão_PDE 2034_2024.09.06.pdf). Acesso em: 24 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**: consolidação de resultados. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível

em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 27 mar. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050: hidreletricidade**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2050>. Acesso em: 15 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Potencial de recursos energéticos no horizonte 2050**: nota técnica PR 04/18. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR\\_RecursoEnergeticos%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursoEnergeticos%202050.pdf). Acesso em: 19 abr. 2025.

ESTEVES, H. B. B. **Perspectivas para o desenvolvimento do mercado de gás natural (e o papel do Estado de Sergipe)**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024. Disponível em: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/arquivos/apresentacao\\_heloisa\\_borges\\_0.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/arquivos/apresentacao_heloisa_borges_0.pdf). Acesso em: 15 jul. 2025.

FERREIRA, H. G.; LORA, E. E. S.; CORREIA, O. L. A. Redução de consumo de diesel em usinas termelétricas em sistemas isolados utilizando ORC e energia elétrica fotovoltaica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – CBENS, 2018, Gramado. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/405/405>. Acesso em: 24 jul. 2025.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo\\_C1\\_como\\_elaborar\\_projeto\\_de\\_pesquisa\\_-\\_antonio\\_carlos\\_gil.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf). Acesso em: 25 ago. 2025.

GÓMEZ, J. M.; CHAMON, P. H.; LIMA, S. B. **Por uma nova ordem energética global?**: potencialidades e perspectivas da questão energética entre os países BRICS. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cint/a/93prT6KGVMQTVzvdyt6QpH/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 7 abr. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **4º Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas**: ano-base 2023. São Paulo: IEMA, dez. 2024. Disponível em: [https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/12/4-inventario-ute-iema-2024\\_V4.pdf](https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/12/4-inventario-ute-iema-2024_V4.pdf). Acesso em: 6 set. 2025.

LAWSON, A.; PEREIRA, G. **Termelétricas e seu papel na matriz energética brasileira**. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/6464a564-1ee8-4cfb-8902-60c899461a1a/content>. Acesso em: 3 abr. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Capacidade instalada de geração elétrica**: Brasil e mundo (2015). Brasília: Núcleo de Estudos Estratégicos de

Energia, 2016. Disponível em:  
<https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/mme66.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MOLIÈRE, M. **The fuel flexibility of gas turbines: a review and retrospective outlook.** *online*. Université de Lorraine, France, 2023. Disponível em:  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3962>. Acesso em: 10 ago. 2025.

NASCIMENTO, F. P. **Classificação da pesquisa:** natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. Brasília: Thesaurus, 2016. Disponível em:  
<https://www.franciscopaulo.com.br/arquivos/Classificando%20a%20Pesquisa.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

OLIVEIRA, F. J. A. de (org.). **O planejamento da operação energética no sistema interligado nacional:** conceitos, modelagem matemática, previsão de geração e carga. São Paulo: Artliber, 2020. Disponível em:  
<https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Livros-da-Diretoria-de-Planejamento-na-biblioteca-digital-ONS/LIVRO-O-PLANEJAMENTO-DA-OPERACAO-ENERGETICA-NO-SISTEMA%20INTERLIGADO-NACIONAL.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2025.

PETINRIN, J. O.; SHAABAN, M. Impact of renewable generation on voltage control in distribution systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Oxford, 2016. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116303094>. Acesso em: 25 ago. 2025.

RIBEIRO, A. H. G. **O campo da energia elétrica no Brasil: 1880–2002.** Rio de Janeiro: UFRJ/IPPUR, 2005. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/rap/a/NWxd9HmK8wJBGKMPq6GcLqz/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 jun. 2025.

VIANA, F. L. E. **Boletim petróleo e gás – dezembro de 2024.** Fortaleza: Banco do Nordeste, ETENE, 2024. Disponível em:  
<https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/3116>. Acesso em: 10 jul. 2025.

VISCONDI, G. F.; SILVA, A. F.; CUNHA, K. B. **Geração termoeletrica e emissões atmosféricas:** poluentes e sistemas de controle. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA, 2016. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/IEMA-EMISSOES.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.