



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO VICTOR DE BRITO ARAÚJO

**PANORAMA DA INFRAESTRUTURA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DO RIO GRANDE DO NORTE**

ANGICOS

2025

JOÃO VICTOR DE BRITO ARAÚJO

**PANORAMA DA INFRAESTRUTURA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DO RIO GRANDE DO NORTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinícius Cândido Henriques

ANGICOS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A663p Araújo, João Victor de Brito.
Panorama da Infraestrutura de Linhas de
Transmissão e Subestações Elétricas do Rio Grande
do Norte / João Victor de Brito Araújo. - 2025.
70 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Linhas de Transmissão. 2. Subestações
Elétricas. 3. Geração Renovável. 4. Infraestrutura
Energética. 5. Geoprocessamento. I. Henriques,
Marcos Vinícius Cândido , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO VICTOR DE BRITO ARAÚJO

**PANORAMA DA INFRAESTRUTURA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E
SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DO RIO GRANDE DO NORTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 25 / 7 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Marcos Vinícius Cândido Henriques, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Gislene Micarla Borges de Lima, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Sebastião Ferreira Baracho Neto, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

*Para minha madrinha Maria das Graças
Barreto de Araújo (In Memoriam).*

*Dedico este trabalho a Deus, fonte de força,
sabedoria e inspiração em cada etapa desta
jornada. Que sua luz continue a guiar meus
passos sempre.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me sustentado em cada passo dessa caminhada. Pela força nos momentos de cansaço, pela sabedoria nos momentos de dúvida e por nunca me deixar desistir, mesmo diante dos desafios. Sem Sua presença constante, essa conquista não seria possível.

Agradeço sinceramente ao meu orientador Marcos Vinícius, pela dedicação, paciência e orientação ao longo desta jornada. Sua disponibilidade, conselhos e olhar atento foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sou grato pela forma como conduziu esse processo com profissionalismo e respeito.

Agradeço à minha família pelo apoio, em especial aos meus pais, Tania e João, pela compreensão e incentivo ao longo de toda essa jornada. Cada palavra de encorajamento e cada gesto de cuidado foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço à minha namorada, Isamara, por todo o apoio, paciência e carinho ao longo desta jornada. Sua presença foi essencial nos momentos de incerteza e cansaço, sempre me incentivando a seguir em frente.

Agradeço à banca examinadora pelas valiosas contribuições, críticas construtivas e pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho, que certamente enriqueceram o resultado final.

Agradeço aos meus amigos do grupo G4 pelo companheirismo, pelo incentivo e pela motivação durante toda essa trajetória. A presença de vocês tornou os momentos difíceis mais leves e as conquistas ainda mais especiais.

Agradeço de forma especial a Bruno Klaus e Edmilson Ferreira, cuja orientação, apoio e incentivo foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sou grato pela dedicação, pelos ensinamentos valiosos e pela motivação que recebi em momentos importantes desta jornada.

Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.

Albert Einstein

RESUMO

A pesquisa investiga a infraestrutura de linhas de transmissão e subestações elétricas no estado do Rio Grande do Norte, destacando sua relevância para o escoamento da geração renovável, especialmente a eólica e a solar. O estudo tem como objetivos mapear as instalações existentes, propor parâmetros para estratégias de implantação, interpretar os resultados obtidos e analisar as vantagens e limitações da atual malha elétrica estadual. Justifica-se diante da crescente demanda por energia limpa, do avanço dos empreendimentos renováveis e da necessidade de integração dessas fontes ao Sistema Interligado Nacional. A metodologia adotada baseia-se na utilização de dados georreferenciados disponibilizados por instituições como ANEEL, EPE e IBGE, integrados e analisados por meio do *software QGIS*. Os resultados indicam concentração de subestações em áreas estratégicas, carência de infraestrutura em regiões de expansão da geração e necessidade de reforços estruturais para garantir confiabilidade, segurança e eficiência no fornecimento. Conclui-se que o fortalecimento da infraestrutura de transmissão é essencial para viabilizar o aproveitamento pleno do potencial energético renovável do estado.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão. Subestações Elétricas. Geração Renovável. Infraestrutura Energética. Geoprocessamento.

ABSTRACT

This study analyzes the transmission lines and electrical substations infrastructure in the state of Rio Grande do Norte, emphasizing its importance for the flow of renewable energy, particularly wind and solar. The objectives include mapping existing installations, proposing strategic implementation parameters, interpreting results, and identifying the strengths and limitations of the state's electrical network. The research is justified by the growing demand for clean energy, the expansion of renewable projects, and the need to integrate these sources into the National Interconnected System. The methodology is based on georeferenced data provided by institutions such as ANEEL, EPE, and IBGE, processed using the QGIS software. The results reveal a concentration of substations in strategic areas, infrastructure gaps in regions with renewable growth, and the need for structural reinforcements to ensure reliability, safety, and operational efficiency. It is concluded that strengthening the transmission infrastructure is essential to enable the full use of the state's renewable energy potential.

Keywords: Transmission Lines. Electrical Substations. Renewable Generation. Energy Infrastructure. Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	– Subestação de Emborcação de 500kV.....	23
Figura 02	– Distribuição nacional das usinas por tipo de fonte de geração.....	29
Figura 03	– Sistema Interligado Nacional - SIN.....	31
Figura 04	– Interface do aplicativo QGIS.....	38
Figura 05	– Interface do site SIGEL... ..	39
Figura 06	– Interface do site Wepmap EPE.....	40
Figura 07	– Subestações do Rio Grande do Norte.....	43
Figura 08	– Linhas de Transmissão e Subestações do Rio Grande do Norte.....	51
Figura 09	– Distribuição geográfica das usinas no RN.....	53
Figura 10	– Centrais Geradoras Solares Fotovoltaicas e Eólicas do RN.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01	– Histograma de ano de operação das subestações.....	45
Gráfico 02	– Linhas de Transmissão e Subestações do Rio Grande do Norte.....	50
Gráfico 03	– Extensão das Linhas de Transmiss.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	– Classificação das Tensões.....	27
Tabela 02	– Linhas de Transmissão e Distribuição.....	28
Tabela 03	– Relação das Subestações Elétricas.....	44
Tabela 04	– Relação das Linhas de Transmissão do RN.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ACSR	Aluminum Conductor Steel Reinforced
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CO ₂	Dióxido de Carbono
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
EAT	Extra-Alta Tensão
EBT	Extra-Baixa Tensão
EIA	Estudos de Impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPL	General Public License - Licença Pública Geral
HVDC	High-Voltage Direct Current - Transmissão de Corrente Contínua em Alta Tensão
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
LT	Linhas de Transmissão
LTR	Lançamento de Longo Prazo
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Média Tensão
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NR	Norma Regulamentadora
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico

PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PEN	Plano da Operação Energética
PET	Plano de Expansão da Transmissão
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QGIS	Quantum Geographic Information System
RAP	Receita Anual Permitida
RIMA	Relatórios de Impacto Ambiental
RN	Rio Grande do Norte
SE	Subestações Elétricas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGEL	Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
UAT	Ultra-Alta Tensão
UHVDC	Ultra-High Voltage Direct Current - Transmissão de Corrente Contínua em Ultra-Alta Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

V	volts
kV	quilovolt
kVca	quilovolt corrente alternada
kVcc	quilovolt corrente contínua
km	quilômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1. Objetivos.....	20
1.1.1. Objetivo geral.....	20
1.1.2. Objetivos específicos.....	20
2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA.....	21
2.1. Fundamentos da Transmissão de Energia Elétrica.....	21
2.2. Subestações Elétricas.....	22
2.3. Linhas de Transmissão.....	25
2.4. Sistema Interligado Nacional - SIN.....	29
2.5. Normas e Regulamentações do Setor Elétrico.....	32
2.6. Expansão da Infraestrutura no Rio Grande do Norte.....	33
2.7. Interligações Regionais.....	36
3 METODOLOGIA.....	37
3.1. QGIS.....	37
3.2. Bases de dados georreferenciados.....	38
3.2.1. ANEEL - SIGEL.....	38
3.2.2. Webmap EPE.....	39
3.2.3. IBGE - Malhas Territoriais.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1. Subestações - base existente.....	41
4.2. Linhas de Transmissão - Base Existente.....	46
4.3. Geração de Energia Sustentável e Infraestrutura Energética.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A expansão das energias renováveis como eólica e solar é uma resposta à procura global de redução da dependência de fontes de energia fósseis e às políticas globais refletidas nas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) de vários países (PETRY, RAMOS e COSTA, 2020).

A utilização de fontes de energia renováveis tem se consolidado como um eixo estratégico no desenvolvimento mundial, graças aos inúmeros benefícios socioeconômicos e ambientais advindos da adoção de práticas sustentáveis, que contribuem para a promoção de equilíbrio entre a preservação do meio ambiente e o bem-estar das pessoas (ARAÚJO *et al.*, 2022). Garantir um futuro energético sustentável está entre os grandes desafios da sociedade neste século. A complexidade de solucionar essa questão decorre da influência dos diversos fatores sociais, tecnológicos, econômicos e políticos, inerentes ao progresso e à exploração dos recursos naturais (HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2021).

A sustentabilidade e a eficiência energética não dizem respeito apenas ao atendimento da demanda futura por energia, mas também à maneira como essa energia será produzida e distribuída. Diante desse cenário, torna-se indispensável discutir os caminhos para uma sustentabilidade energética, onde o processo esteja alinhado com a preservação dos recursos naturais, com a ampliação do acesso à energia renovável para populações ainda não atendidas e com a minimização de conflitos geopolíticos decorrentes da crescente demanda energética (GOLDEMBERG e CHU, 2010).

Segundo Macedo, Melo e Silva (2023), a intensificação das preocupações com as mudanças climáticas têm promovido transformações significativas nas políticas energéticas de países desenvolvidos e emergentes, estimulando investimentos orientados à sustentabilidade. Nesse contexto, o setor energético assume papel estratégico no processo de descarbonização, dada sua expressiva participação nas emissões globais de GEEs originários do processo de fornecimento de serviços de energia. Destaca-se, nesse processo, a ampliação das fontes renováveis modernas, como a energia eólica e a solar fotovoltaica, cuja expansão tem contribuído para a transição energética global por meio da diversificação das matrizes elétricas e para a consolidação de modelos de desenvolvimento de baixo carbono.

Historicamente, o sistema energético global estruturou-se com base em fontes fósseis, caracterizadas por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros GEEs. Diante da intensificação das mudanças climáticas, a descarbonização do setor energético tornou-se uma prioridade internacional, exigindo a reformulação das matrizes energéticas nacionais. Esse

processo passa, necessariamente, pela adoção de políticas públicas que viabilizem a transição para fontes mais limpas e sustentáveis, como as energias renováveis e o gás natural (LOSEKANN e TAVARES, 2021)

Para Losekann e Hallack (2018) a configuração da matriz energética brasileira no cenário internacional destaca-se por sua singularidade, em razão da ampla disponibilidade de recursos naturais renováveis no território nacional. Essa condição permitiu ao país trilhar uma trajetória distinta, resultando em uma matriz energética consideravelmente mais limpa em comparação à média mundial. Em 2018, cerca de 85% da geração elétrica brasileira provém de fontes renováveis, com destaque histórico para a energia hidrelétrica, tecnologia amplamente conhecida e difundida no território nacional. Contudo, o avanço da expansão hidrelétrica tem enfrentado limitações crescentes, tanto do ponto de vista econômico quanto socioambiental, o que impõe a necessidade de reconfiguração da matriz. Nesse contexto, torna-se estratégico intensificar a incorporação de fontes alternativas, como a solar e a eólica, a fim de assegurar a sustentabilidade, a segurança e a resiliência do sistema elétrico nacional.

Os sistemas de geração, transmissão e distribuição estão conectados em série. Primeiramente, ocorre a geração de energia elétrica, feita por geradores, que produzem energia em um nível de tensão média. Esta etapa requer uma Subestação (SE) elevadora, que eleve o nível de tensão da energia e a transmita através de Linhas de Transmissão (LT) em alta ou tensão extra alta até os pontos de carga de outra SE. Esses locais de carga da SE rebaixadora, tem o intuito de reduzir o nível de tensão para média ou baixa, integrando-se ao sistema de distribuição (CABRAL, 2018)

O Brasil é um dos países que mais investe em tecnologia de energia eólica, especialmente no Nordeste, o mercado de energia no Rio Grande do Norte (RN) apresenta as maiores taxas de crescimento dos últimos anos. Contudo, uma expansão eficaz exige que a produção e distribuição desta energia estejam em perfeita harmonia. Isso significa que a expansão dos parques eólicos/solares deve ser acompanhada da construção de LT para distribuir essa energia elétrica à população. A falta de LT, devido a atrasos históricos no desenvolvimento da infraestrutura elétrica, é considerada um dos principais gargalos para uma utilização mais eficiente do potencial eólico e solar no estado (DANTAS, 2021).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) constitui a principal estrutura de geração e transmissão de energia elétrica no Brasil, integrando os subsistemas das regiões Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e parte da região Norte. Caracteriza-se pela predominância de usinas hidrelétricas, complementadas por fontes térmicas, eólicas e solares, conectadas por uma ampla malha de transmissão que viabiliza o intercâmbio energético entre

as regiões. Essa configuração permite otimizar a operação do sistema por meio do aproveitamento da diversidade hidrológica nacional, garantindo maior confiabilidade, segurança e economicidade no suprimento de energia elétrica. A coordenação do SIN é realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que atua na supervisão centralizada da operação e no despacho da geração conforme as condições sistêmicas (ONS, 2024a).

O SIN, criado em 2014 tem como objetivo possibilitar a transmissão de energia elétrica entre estados, sem necessariamente em um dos estados ter a cogeração de energia, para isso fez-se necessário a implementação de uma LT interligada em todo território nacional, SE que realizem as transformações de tensão que são essenciais. A Rede Básica do SIN abrange tensões variando de 230 KVca a 750KVca, 600KVcc a 800KVcc, os níveis de tensão de transmissão mais comuns são 230KVca a 750KVca, sendo indispensável a implementação de uma nova rede no país a partir do ano de 2014 para suportar essa tensão. Um dos principais pontos a ser decidido para implementação de uma linha de transmissão e/ou subestação é a sua localização. Análogo ao exposto, a problemática deste estudo é identificar os critérios para a escolha da locação de uma linha de transmissão e/ou subestação.

Ante o exposto, a pergunta que norteia a pesquisa é colocada: **“Quais as especificações e estratégias para tomada de decisão das localizações das linhas de transmissão e subestações no estado do Rio Grande do Norte?”**

1.1. Objetivos

De forma a orientar a pesquisa, foram definidos os objetivos gerais e específicos.

1.1.1. Objetivo geral

Realizar um estudo de caso acerca da importância estratégica da instalação de linhas de transmissão e subestações no RN. Utilizando como base dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para análise, compreensão e construção de mapas no *QGIS®*.

1.1.2. Objetivos específicos

- Apresentação de mapas das instalações de linhas de transmissão e subestação;
- Elaborar os parâmetros para estratégia de implantação;
- Elucidar os resultados obtidos;
- Identificar as vantagens e desvantagens da implementação de estratégias.

2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

2.1. Fundamentos da Transmissão de Energia Elétrica

A transmissão de energia elétrica é o processo responsável pelo transporte de grandes blocos de energia elétrica em alta tensão, desde os centros de geração até os centros de consumo, comumente localizados a longas distâncias. Seu funcionamento está baseado nas leis do eletromagnetismo, utilizando LT com corrente alternada (CA) na maioria dos casos, embora também existam linhas em corrente contínua (CC) para aplicações específicas. Esse sistema envolve torres metálicas, cabos condutores, isoladores e equipamentos de proteção e controle, como disjuntores e transformadores. A operação em alta tensão tem como objetivo reduzir as perdas elétricas por efeito Joule, aumentando a eficiência do transporte (ONS, 2024a).

No Brasil, os níveis de tensão utilizados na transmissão de energia variam conforme a distância e a potência a ser transportada. Os valores mais comuns incluem 69 kV, 138 kV, 230 kV e 500 kV, sendo este último amplamente utilizado para interligar regiões distantes no SIN. Existem ainda projetos operando em 750 kV, geralmente voltados para interligações internacionais. O ONS destaca, em seu Relatório Anual de 2024, a ampliação das linhas em 500 kV, com foco em reforçar a segurança do sistema frente ao aumento da demanda e à maior inserção de fontes renováveis (ONS, 2024b, 2024c).

A transmissão ocorre em tensões elevadas e grandes distâncias, sendo operada por concessionárias sob regulação federal. Já a distribuição envolve tensões médias e baixas (até 69 kV), levando a energia elétrica diretamente aos consumidores finais como por exemplo residências, comércios e pequenas indústrias. É essencial compreender a diferença entre os sistemas de transmissão e distribuição pois a interface entre os dois sistemas ocorre nas SE, onde a energia é rebaixada para níveis adequados ao consumo. Essa separação é necessária para garantir a organização e eficiência do sistema elétrico nacional (MME, 2024).

Com o avanço das fontes renováveis, como a energia eólica e solar, a necessidade de novas LT cresce constantemente. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034), publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), serão necessários mais de R\$ 128 bilhões em investimentos na expansão da malha de transmissão até 2034. Esse crescimento visa garantir o escoamento da geração renovável, especialmente em regiões como o Nordeste e o Centro-Oeste, que concentram grande potencial solar e eólico (EPE, 2024a, 2024b).

O planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro ocorre pelo PEN 2024 (Plano da Operação Energética), elaborado pelo ONS, destaca os desafios relacionados à variabilidade da geração renovável, ao comportamento hidrológico e à integração das novas fontes ao SIN. O planejamento da transmissão busca, assim, garantir segurança energética, confiabilidade e modicidade tarifária, apoiando-se em análises técnicas, estudos de fluxo de potência e avaliação de contingências operativas (ONS, 2024c). Esse esforço coordenado entre ONS, EPE e o Ministério de Minas e Energia (MME) reforça a importância da transmissão como pilar do sistema elétrico nacional.

2.2. Subestações Elétricas

As SE são elementos fundamentais no sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro. Elas funcionam como pontos de interligação entre as usinas geradoras e as LT, promovendo a adequada transformação dos níveis de tensão e garantindo a confiabilidade operacional do SIN. Devido à extensão territorial do Brasil, essas instalações são essenciais para viabilizar o transporte de energia a longas distâncias com eficiência (OLIVEIRA; SILVA; MORAES, 2021).

Entre as principais funções das SE estão a transformação, a proteção e o seccionamento. A transformação é realizada por transformadores que elevam ou reduzem os níveis de tensão, adequando-os ao transporte e ao consumo. Essa função permite a redução de perdas por efeito Joule em longas distâncias e a adequação às necessidades da distribuição (SOUZA; GONÇALVES, 2020). A proteção é garantida por dispositivos como disjuntores e relés de proteção, que atuam de forma seletiva diante de falhas, preservando a integridade do sistema. Já o seccionamento é feito por chaves que possibilitam o desligamento de partes da SE para manutenção ou em casos de emergência, sem afetar todo o sistema (ALMEIDA; LIMA, 2021).

As estações de transformação de energia elétricas, comumente conhecida como SE, podem ser classificadas de acordo com sua função dentro do sistema elétrico. No Brasil, as mais comuns no sistema de transmissão são as SE elevadoras (*step-up*) e as rebaixadoras (*step-down*). As *step-up* são geralmente instaladas nas usinas geradoras e têm como principal função elevar a tensão da energia produzida, reduzindo perdas durante a transmissão em longas distâncias. Já as *step-down* são utilizadas para reduzir a tensão em pontos próximos aos centros de carga, tornando-a adequada para a distribuição e o consumo final (SANTOS *et al.*, 2023).

Figura 01 - Subestação de Emborcação de 500kV



Fonte: Cardoso, Lamounier e Barcelos. Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística Senac (2014)

As SE coletoras, são outro tipo que reúnem a energia gerada por diferentes unidades, como em complexos eólicos e solares, e a direcionam para a rede de transmissão. Esse modelo tem ganhado importância com a expansão das fontes renováveis no Brasil. De acordo com Souza e Prado (2021), as SE coletoras são estratégicas para integrar a geração distribuída ao SIN, garantindo estabilidade e eficiência no escoamento da energia.

As SE de manobra, cuja função principal é o controle e o direcionamento dos fluxos de energia na rede, sem transformação significativa de tensão. Essas SE são fundamentais para a confiabilidade do sistema, permitindo maior flexibilidade operacional e manutenções com menor impacto ao fornecimento (CAMPOS; REZENDE, 2020). Por fim, com o avanço da automação, começam a se consolidar também as SE digitais, que integram sistemas de proteção, controle e monitoramento com comunicação digital, promovendo maior eficiência operacional (MOURA; NASCIMENTO, 2022).

As SE são formadas por uma variedade de dispositivos fundamentais para garantir o funcionamento seguro, eficiente e contínuo do sistema de transmissão. Entre os principais componentes destacam-se os transformadores de potência, que são responsáveis por realizar a elevação ou redução da tensão elétrica, ou seja, a adequação dos níveis de tensão entre as etapas de geração, transmissão e distribuição. Ressalta-se que o controle e a conformidade dos

níveis de tensão ao longo do sistema elétrico só são viáveis por meio do uso de transformadores instalados em SE, cuja função varia conforme o estágio da rede, no contexto da transmissão, utilizam-se SE elevadoras para aumentar a tensão, enquanto nas etapas de subtransmissão e distribuição são empregadas SE abaixadoras, responsáveis pela redução dos níveis de tensão conforme a demanda (CABRAL, 2018).

Esses equipamentos operam de forma contínua e devem ser projetados com alta robustez e eficiência, visto que atuam sob grandes cargas e tensões elevadas. Segundo Nascimento *et al.* (2021), os transformadores de potência representam o núcleo funcional das SE, sendo responsáveis pela interligação entre os diferentes níveis de tensão do SIN.

Outro componente fundamental são os disjuntores, dispositivos de proteção responsáveis por interromper o fluxo de corrente elétrica em situações de sobrecarga ou curto-circuito. Eles atuam automaticamente para preservar os demais equipamentos e garantir a segurança operacional. No sistema brasileiro, predominam os disjuntores de alta tensão com tecnologia a gás SF₆, devido à sua alta capacidade de interrupção e confiabilidade. Conforme destaca Moraes e Silva (2020), os disjuntores são indispensáveis para a seletividade e coordenação da proteção, elementos-chave na estabilidade da transmissão em grandes blocos regionais.

Os barramentos funcionam como caminhos condutores para a distribuição da energia elétrica entre os equipamentos dentro da SE. Os barramentos podem ser dispostos em diferentes arranjos, como por exemplo simples, duplos, em anel ou com seccionadores, conforme a necessidade de confiabilidade e flexibilidade do sistema. Segundo Carvalho e Ferreira (2019), o tipo de barramento impacta diretamente a operação e a manutenção das SE, sendo um dos fatores de projeto mais críticos para garantir a continuidade do fornecimento em casos de falhas ou intervenções planejadas.

É importante destacar outros elementos indispensáveis, como os relés de proteção, que monitoram grandezas elétricas e enviam comandos aos disjuntores quando detectam condições anômalas; e os seccionadores, que possibilitam o isolamento de partes do circuito para manutenções, sem interrupção do fornecimento a outras áreas. A modernização dessas estruturas, com a adoção de sensores inteligentes e comunicação digital, tem permitido uma operação mais precisa e segura, como demonstrado por Souza *et al.* (2022) em análises de SE digitalizadas em operação no Brasil.

2.3. Linhas de Transmissão

As LT representam o elo físico do sistema elétrico responsável por transportar grandes blocos de energia entre as SE do SIN. Elas operam em alta ou extra-alta tensão e são compostas por uma estrutura complexa que envolve diversos elementos que garantem sua funcionalidade, segurança e eficiência. Seu planejamento e implantação demandam rigor técnico, pois influenciam diretamente a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica em todo o território nacional (EPE, 2017).

A estrutura física de uma LT é composta por torres, cabos condutores, cabos de guarda, isoladores, fundações e demais componentes eletromecânicos e civis que garantem o suporte e o isolamento da linha. As torres metálicas são os elementos mais visíveis e têm a função de sustentar os condutores a uma altura segura do solo, evitando curtos-circuitos com a vegetação, edificações ou outros objetos. Elas podem ser do tipo autoportante ou estaiada, sendo a escolha condicionada ao relevo, à tensão da linha e à resistência ao vento (SANTOS; OLIVEIRA; LIMA, 2022).

Os cabos condutores são normalmente compostos por alumínio com alma de aço (ACSR – *Aluminum Conductor Steel Reinforced*), combinando boa condutividade elétrica com resistência mecânica. Já os cabos de guarda, instalados no topo das torres, têm como principal função a proteção contra descargas atmosféricas, funcionando como para-raios e garantindo a continuidade do fornecimento durante tempestades (MOURA; NASCIMENTO, 2022).

Os isoladores, geralmente de porcelana, vidro temperado ou polímeros compostos, desempenham a função crítica de isolar eletricamente os condutores da estrutura metálica das torres. Eles precisam resistir tanto à tensão elétrica quanto aos esforços mecânicos, além de fatores ambientais como poluição, umidade e salinidade. De acordo com Carvalho e Ferreira (2019), a escolha do tipo e da geometria dos isoladores influencia diretamente a confiabilidade operacional da linha.

As LT podem operar tanto em CA quanto em CC. No Brasil, predominam as linhas em CA, devido à compatibilidade com a maior parte da infraestrutura existente e à facilidade de transformação dos níveis de tensão. No entanto, a tecnologia em CC vem sendo empregada em projetos específicos de grande porte, como a linha Belo Monte-Rio de Janeiro, que utiliza transmissão em ultra-alta tensão contínua (UHVDC- Ultra-High Voltage Direct Current), com o objetivo de minimizar perdas em distâncias superiores a 2.000 km (ONS, 2024d).

As linhas em CA apresentam vantagens como a padronização da rede e a facilidade de

integração com o SIN, mas estão mais sujeitas a perdas capacitivas em longas distâncias. Já as linhas em CC permitem maior controle de fluxo de potência e menores perdas resistivas, sendo indicadas para interligações de longa distância, conexões submarinas ou integração de grandes blocos de geração renovável (EPE, 2024d).

Quanto à instalação física, as LT podem ser aéreas ou subterrâneas. As linhas aéreas são mais comuns devido ao menor custo de implantação e maior facilidade de manutenção. Já as linhas subterrâneas, embora mais onerosas, são utilizadas em áreas urbanas densas, zonas ambientalmente sensíveis ou regiões de difícil acesso. Segundo estudos da ANEEL (2023), o custo de uma linha subterrânea pode ser de 5 a 10 vezes superior ao de uma linha aérea equivalente, mas apresenta vantagens em termos de impacto visual, segurança e confiabilidade contra intempéries.

O traçado das LT é definido com base em critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Entre os fatores técnicos estão a distância entre as SE, as condições topográficas, a acessibilidade para obras e manutenções, e a viabilidade de implantação das estruturas físicas. O traçado deve buscar o menor custo possível, mas sempre respeitando a confiabilidade, a segurança e os prazos de implantação (EPE, 2024a).

Do ponto de vista ambiental, o traçado deve minimizar os impactos sobre áreas de preservação, recursos hídricos, comunidades tradicionais e zonas de proteção. A legislação ambiental brasileira exige a realização de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), além de audiências públicas para o licenciamento dos empreendimentos. A obtenção das licenças prévia, de instalação e de operação junto aos órgãos competentes é condição indispensável para o início das obras (IBAMA, 2022).

Outro fator relevante é o aspecto social, especialmente a necessidade de negociação com proprietários de terras para a constituição de faixas de servidão, onde as torres e cabos serão instalados. A negociação dessas áreas deve respeitar critérios de indenização justos e legalmente estabelecidos. O envolvimento de comunidades afetadas desde as etapas iniciais do projeto é fundamental para garantir a aceitação social da obra (SOUZA; PRADO, 2021).

O cronograma de construção é influenciado pela complexidade do terreno, condições climáticas, logística de transporte de estruturas e materiais, além da disponibilidade de mão de obra qualificada. Segundo o ONS (2024e), atrasos em LT representam riscos relevantes à segurança energética, motivo pelo qual a fiscalização e o acompanhamento de obras pela ANEEL e pelo MME têm sido intensificados nos últimos anos.

Tabela 01 - Classificação das Tensões

Classificação		Tensão	
		Corrente Alternada	Corrente Contínua
UAT	Ultra-Alta Tensão	750 kV>	600 kV>
EAT	Extra-Alta Tensão	230 kV< $V \leq 750$ kV	
AT	Alta Tensão	36,2 kV< $V \leq 230$ kV	
MT	Média Tensão	1 kV< $V \leq 36,2$ kV	1,5 kV< V
BT	Baixa Tensão	≤ 1 kV	$\leq 1,5$ kV
EBT	Extra-Baixa Tensão	<50 V	<120 V

Fonte: autoria própria com base nas normas (2025)

A classificação dos níveis de tensão elétrica no Brasil apresentados na tabela 1, varia conforme a norma ou órgão regulador adotado, refletindo diferentes finalidades técnicas e contextos de aplicação. A Norma Regulamentadora (NR) nº 10, do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), define como Extra-Baixa Tensão valores inferiores a 50 V em CA e 120 V em CC, e como Baixa Tensão aqueles até 1 kVca ou 1,5 kVcc (BRASIL, 2004).

A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) nº 5410 elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) confirma esse limite, estabelecendo critérios técnicos para instalações de baixa tensão (ABNT, 2004). Já a Média Tensão é definida na NBR 14039 como a faixa de 1 kV a 36,2 kV, aplicável a sistemas de distribuição primária (ABNT, 2005). Por sua vez, a ANEEL, por meio do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), adota uma classificação mais ampla, BT até 1 kV, MT entre 1 kV e 69 kV, Alta Tensão entre 69 kV e 230 kV, e Extra-Alta Tensão acima de 230 kV (ANEEL, 2011). A faixa de Ultra-Alta Tensão, embora não esteja formalmente estabelecida em normas nacionais, é reconhecida em contextos técnicos por alguns autores como Leitão (2014) como ≥ 750 kVca e ≥ 600 kVcc.

De acordo com a Nota Técnica nº 0075/2011-SRD/ANEEL, a ANEEL estabelece os seguintes níveis padronizados de tensão para cada sistema, como detalhado a seguir:

- Transmissão e subtransmissão: 750; 500; 230; 138; 69; 34,5; 13,8 kV;
- Distribuição primária em redes públicas: 34,5 e 13,8 kV;
- Distribuição secundária em redes públicas: 380/220 e 220/127 volts, em redes trifásicas; 440/220 e 254/127 volts, em redes monofásicas;

Tabela 02 - Linhas de Transmissão e Distribuição

Classificação	Tensão	Função Principal	Aplicação
EAT	500 kV+	Transmissão em longas distâncias	Interligação nacional, grandes usinas (hidrelétricas, termelétricas).
EAT/AT	230 kV	Subtransmissão regional	Liga subestações principais a redes estaduais/industriais.
AT	138 kV	Subtransmissão para áreas urbanas	Alimentação de subestações em cidades grandes.
AT	69 kV	Subtransmissão local	Conexão entre subestações urbanas e industriais.
MT	34,5 kV	Distribuição primária	Redes urbanas/rural para indústrias médias e transformadores de bairro.
MT	13,8 kV	Distribuição local	Alimentação de consumidores comerciais e transformadores residenciais.
BT	≤ 1 kV (220V/127V)	Consumo final	Residências, comércios e pequenas indústrias.

Fonte: adaptado de EPE *Webmap* (EPE, 2025)

A tabela 02 apresentada organiza de forma clara os níveis padronizados de tensão elétrica utilizados no Brasil, relacionando cada faixa a sua função principal e à respectiva aplicação no sistema elétrico. As classificações seguem o padrão adotado pela ANEEL, conforme estabelecido na Nota Técnica nº 0075/2011-SRD/ANEEL, que orienta os parâmetros operacionais e estruturais dos sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição. No topo da hierarquia, encontram-se as tensões da ordem de 500 kV e 750 kV, classificadas como EAT, voltadas à transmissão em longas distâncias, como nas interligações nacionais e em usinas de grande porte, a exemplo das hidrelétricas e termelétricas.

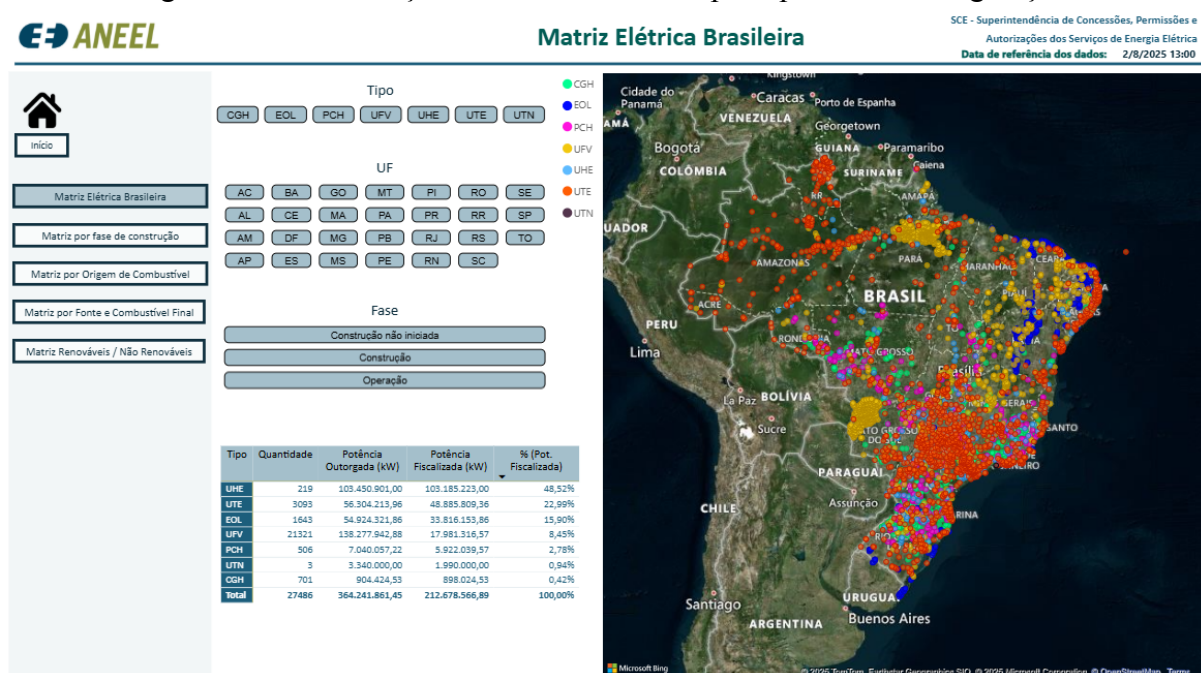
Em seguida, tensões como 230 kV, 138 kV e 69 kV são associadas à subtransmissão regional e local, desempenhando papel estratégico na conexão entre SE e no suprimento de áreas urbanas e industriais. As faixas de MT, como 34,5 kV e 13,8 kV, são empregadas na distribuição primária e local, atendendo a transformadores de bairro e consumidores de médio porte. Por fim, a Baixa Tensão, inferior a 1 kV, abrange os sistemas de consumo final, comuns em residências, comércios e pequenas indústrias. A padronização desses níveis de tensão, além de garantir a interoperabilidade entre os equipamentos e a segurança operacional, também facilita a regulação técnica e econômica do setor, sendo amplamente referenciada em

normas como a NBR 14039 (ABNT, 2005), NBR 5410 (ABNT, 2004) e na NR-10 (BRASIL, 2004).

2.4. Sistema Interligado Nacional - SIN

O SIN é a principal estrutura de transmissão e operação de energia elétrica do Brasil, responsável por integrar a maior parte da geração e consumo do país. O SIN conecta, de forma coordenada e integrada, as instalações de geração, transmissão e distribuição, permitindo a operação centralizada do sistema elétrico. Essa operação conjunta assegura maior eficiência, segurança e confiabilidade no fornecimento de energia, além de contribuir para a modicidade tarifária por meio do uso otimizado dos recursos energéticos disponíveis em todo o território nacional. A ANEEL exerce papel regulatório fundamental no setor, definindo diretrizes, normatizando e fiscalizando o funcionamento do sistema elétrico, garantindo o cumprimento das políticas públicas, embora não seja diretamente responsável pela operação do SIN (ONS, 2024a; EPE, 2024a).

Figura 02 – Distribuição nacional das usinas por tipo de fonte de geração



Fonte: ANEEL (2025)

A Figura 2 mostra a distribuição espacial da geração de energia no Brasil, evidenciando a concentração por fonte e região, e a posição estratégica do Nordeste no fornecimento de energia renovável. A matriz energética apresenta sete tipos de geração, sendo elas Central Geradora Hidrelétrica (CGH), Eólica (EOL), Pequena Central Hidrelétrica (PCH), Usina Fotovoltaica (UFV), Usina Hidrelétrica (UHE), Usina Termelétrica (UTE) e

Usina Termonuclear (UTN). As principais fontes de geração de energia no território nacional é UHE com 48,52%, UTE 22,99%, EOL 15,90% e UFV 8,45%(ANEEL, 2025).

A concepção do SIN remonta à década de 1960, período no qual a infraestrutura de transmissão brasileira começou a ser ampliada para interligar sistemas regionais isolados. Inicialmente, esses sistemas funcionavam de maneira independente, limitando o intercâmbio de energia e a otimização dos recursos, principalmente os hidrelétricos abundantes em certas regiões. A interligação gradual entre sistemas estaduais e regionais permitiu ampliar a segurança e eficiência do fornecimento. No entanto, foi a reforma do setor elétrico na década de 1990 que proporcionou a institucionalização definitiva do SIN, com a criação do ONS, por meio da Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998 (BRASIL, 1998).

O principal objetivo do SIN é garantir a operação coordenada das usinas geradoras e das redes de transmissão, assegurando a segurança, a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica em todo o país. Além disso, busca otimizar a utilização dos recursos energéticos nacionais, reduzir os custos operacionais e possibilitar o intercâmbio de energia entre as diversas regiões, que apresentam características distintas de geração e consumo (EPE, 2024a; ONS, 2024a).

A integração das regiões brasileiras por meio do SIN traz diversos benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Ao permitir a troca de energia em tempo real entre as regiões com excedentes e aquelas com maior demanda, o sistema promove o equilíbrio da oferta e da demanda em escala nacional, o que é especialmente importante em uma matriz energética predominantemente hidrelétrica, sujeita a variações sazonais e hidrológicas. Essa capacidade de transferência reduz a necessidade do acionamento de usinas termelétricas, que possuem maior custo operacional e impacto ambiental, contribuindo para a sustentabilidade do setor elétrico (ONS, 2024a).

Além disso, o SIN aumenta a confiabilidade do sistema elétrico ao permitir que as reservas operacionais sejam compartilhadas entre as regiões, reduzindo a necessidade de manutenção de reservas locais excessivas. A interligação também permite uma resposta mais eficiente a contingências, aumentando a segurança do fornecimento. A existência do SIN possibilita ainda um planejamento integrado da expansão da infraestrutura elétrica, evitando duplicidades e otimizando os investimentos em transmissão e geração (EPE, 2024a).

O ONS é a entidade responsável pela coordenação, controle e supervisão da operação do SIN, atuando de forma neutra e técnica. Criado pela Lei nº 9.648/1998, o ONS tem como missão garantir que o sistema opere com segurança, confiabilidade e economicidade, observando critérios técnicos e normativos estabelecidos pela regulação do setor (BRASIL,

2.5. Normas e Regulamentações do Setor Elétrico

O setor elétrico brasileiro é altamente regulado e estruturado para garantir segurança jurídica, eficiência técnica e equilíbrio econômico entre os agentes. A legislação vigente define diretrizes para a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, bem como o papel das principais instituições responsáveis pela regulação, fiscalização, planejamento e operação do sistema. Entre os principais marcos legais destacam-se a Lei nº 9.427/1996, que criou a ANEEL, e a Lei nº 10.847/2004, que instituiu a EPE, além de resoluções normativas, decretos e manuais técnicos aplicáveis ao setor. A estrutura regulatória visa garantir a confiabilidade do sistema elétrico, a modicidade tarifária e a sustentabilidade dos investimentos no setor (BRASIL, 1996; BRASIL, 2004).

A ANEEL é responsável por regulamentar e fiscalizar os serviços de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no Brasil. Como órgão regulador independente, sua função é assegurar que os agentes do setor operem conforme normas técnicas e legais, promovendo a modicidade tarifária e a qualidade no fornecimento de energia. A ANEEL é incumbida de realizar leilões de concessão e outorga de projetos, além de definir critérios técnicos para a expansão e operação do sistema (BRASIL, 1996).

Já a EPE é vinculada ao Ministério de Minas e Energia e atua no planejamento de longo prazo do setor energético. A EPE elabora estudos técnicos que embasam a formulação de políticas públicas e decisões sobre expansão da geração e da transmissão, incluindo o PDE. Esses estudos consideram aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, garantindo que o crescimento do setor esteja alinhado com as metas nacionais de desenvolvimento e sustentabilidade (EPE, 2024a).

A implantação de empreendimentos de transmissão de energia elétrica no Brasil segue um processo regulatório rigoroso. Primeiramente, o projeto deve ser autorizado ou licitado pela ANEEL, que define as condições de outorga, prazos de execução e critérios técnicos. Após essa etapa, o empreendedor deve obter o licenciamento ambiental junto aos órgãos competentes, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), órgão federal, ou entidades estaduais, conforme a abrangência do empreendimento (IBAMA, 2022).

O processo de licenciamento geralmente é dividido em três fases: Licença Prévia (LP), que avalia a viabilidade ambiental; Licença de Instalação (LI), que autoriza o início das obras; e Licença de Operação (LO), que permite o funcionamento do empreendimento. Além disso, são exigidos estudos como o EIA e o RIMA, os quais devem ser analisados em audiências

públicas. O cumprimento dessas etapas é obrigatório e visa mitigar impactos socioambientais, além de garantir a legalidade da operação (Lei Complementar nº 140, 2011, alterado pelo Decreto nº 8.437, 2015; CONAMA, 1986).

Os empreendimentos de transmissão devem atender a parâmetros técnicos estabelecidos pelo ONS, com base em critérios de confiabilidade, desempenho e segurança. Esses parâmetros estão descritos nos Procedimentos de Rede, que normatizam as condições técnicas mínimas para a operação e integração de novas instalações ao SIN (ONS, 2024e).

No que diz respeito à regulação tarifária, a ANEEL adota o modelo de receita anual permitida (RAP), que remunera os agentes com base nos custos eficientes de construção, operação e manutenção das instalações de transmissão. Os valores são atualizados periodicamente por revisão tarifária, considerando fatores como inflação, produtividade e necessidade de investimentos. Esse modelo visa garantir equilíbrio financeiro às concessionárias e modicidade tarifária aos consumidores, sendo um dos pilares da sustentabilidade econômica do setor elétrico (ANEEL, 2024).

2.6. Expansão da Infraestrutura no Rio Grande do Norte

A chegada da eletricidade ao RN remonta ao início do século XX, mais precisamente em 1911, com a instalação do primeiro bonde elétrico em Natal, marco simbólico da introdução da energia elétrica na capital, esse evento destaca-se como o início da utilização regular de eletricidade em serviços urbanos em Natal. Inicialmente voltada ao transporte urbano e à iluminação pública, a eletrificação da cidade refletia a lógica das concessões privadas vigentes na época, com sistemas isolados, operando de forma limitada e sem conexão regional (ANDRADE, 2009).

Segundo Andrade (2009) esse modelo de eletrificação urbana restringia-se às áreas centrais e de maior valor econômico, sendo ampliado de forma gradual conforme a demanda urbana e industrial se intensificava. Esse período marcou a introdução da energia elétrica como elemento estruturante do espaço urbano, ainda que de maneira limitada, destacando a atuação inicial da iniciativa privada na prestação dos serviços elétricos. A eletrificação da capital potiguar foi marcada por dificuldades técnicas e econômicas, exigindo a intervenção posterior do poder público para viabilizar a expansão do serviço.

A transformação do setor energético potiguar começou com a criação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf), em 1945. A partir da década de 1950, a Chesf passou a expandir a infraestrutura de transmissão no Nordeste, permitindo a integração de

estados como o RN a um sistema regional interligado. A energia gerada pelas usinas do rio São Francisco passou a abastecer diversas cidades potiguares, representando um marco para o desenvolvimento industrial e urbano do estado (ARAÚJO, 2015).

Em 1961 foi criada a Companhia Energética do Rio Grande do Norte (Cosern), estatal responsável pela distribuição e, em alguns casos, também pela transmissão da energia no estado. Em 1962, a Cosern iniciou o processo de interiorização da energia elétrica, com destaque para a conexão dos municípios de Santa Cruz, Tangará e Serra Caiada, antes dependentes de sistemas isolados (NEOENERGIA COSERN, 2017).

A plena integração do RN ao SIN ocorreu nas décadas seguintes, especialmente durante os anos 1980, com a ampliação da malha de LT de alta tensão. Isso permitiu maior segurança energética e o intercâmbio de energia com outros estados da região Nordeste, sob a coordenação do então recém-criado ONS em 1998 (ONS, 2003).

A privatização da Cosern em 1997 trouxe novos investimentos para a modernização do sistema de transmissão no RN. A partir dos anos 2000, com o avanço da geração eólica em áreas remotas, surgiram novos desafios de infraestrutura. A necessidade de escoamento dessa energia renovável impulsionou a construção de novas LT e SE, que passaram a ser consideradas estratégicas no planejamento energético nacional (MEMÓRIA DA ELETRICIDADE, 2018).

A expansão da infraestrutura de transmissão no RN acompanha o boom da geração renovável, especialmente eólica e solar, ocorrida nas últimas duas décadas, transformando o estado em um polo estratégico do setor elétrico nacional. O RN passou de importador a exportador de energia, graças à instalação de parques eólicos e à expansão da malha elétrica, com LT e SE modernas conectadas ao SIN. Esse movimento impõe demandas por transmissão capilar, capaz de transportar energia de áreas de geração (litoral e Seridó) até os centros de consumo (ARAÚJO, 2019).

Além dos investimentos em transmissão centralizada, o avanço da geração solar distribuída no estado também demandou ajustes na rede elétrica. A integração de sistemas fotovoltaicos em residências e propriedades rurais provoca fluxos de energia bidirecionais que exigem melhorias na infraestrutura de distribuição e transmissão. Isso evidencia não apenas a necessidade de reforçar a rede principal, mas também de aperfeiçoar equipamentos de proteção, automação e medição, para garantir estabilidade e qualidade no fornecimento (NUNES, 2017).

Segundo Ferreira (2019), essa expansão reflete a consolidação de projetos fotovoltaicos no ambiente de contratação regulada (ACR), que exigem LT capazes de

transportar a energia dos parques até os centros consumidores, sob risco de se criar gargalos se a infraestrutura não for adequada. O estudo aponta ainda que, apesar do potencial para expansão, a rede ainda enfrenta desafios estruturais como a necessidade de SE e linhas adequadas ao fluxo reverso de energia fotovoltaica, além de implicações socioambientais decorrentes da necessidade de articular planejamento técnico e diálogo com comunidades locais. Isso enfatiza o caráter estratégico da transmissão como peça central na viabilização da transição energética no estado.

O RN destaca-se por sua liderança na geração eólica nacional, sustentada por condições naturais favoráveis, como ventos constantes e intensos no litoral e áreas semiáridas. Esse potencial fez com que o estado atraísse investimentos massivos em parques eólicos, exigindo a expansão da infraestrutura de transmissão para integrar os pontos de geração ao SIN e garantir escoamento eficiente (MELO, 2021).

A implantação rápida de empreendimentos eólicos revelou gargalos técnicos na malha elétrica existente. Conforme Lima *et al.* (2024), a expansão da rede de transmissão é necessária para eliminar restrições operativas, reduzir perdas e garantir a confiabilidade do sistema diante do aumento da oferta energética per capita no estado.

O RN tem se destacado na expansão de energia renovável, especialmente no segmento eólico, cuja instalação em vastas áreas do Semiárido potiguar exige reforços na infraestrutura de transmissão. Estudos sobre o impacto ambiental dos parques eólicos revelam que essas tecnologias vêm sendo implementadas na região desde meados de 2024, o que demandou novas linhas de alta tensão para conectar os geradores ao SIN (SIQUEIRA, 2024).

Paralelamente, a adoção crescente de geração solar fotovoltaica, tanto em escala centralizada quanto distribuída, tem pressionado por ajustes adicionais na rede elétrica. O elevado índice de radiação solar no RN torna necessária a construção de SE e de sistemas de automação, além da modernização da rede de distribuição para garantir estabilidade e qualidade no fornecimento dos novos fluxos energéticos (AUGUSTO, 2013).

De acordo com Melo (2021) o RN consolidou-se como referência nacional em energia eólica, com destaque para a sua capacidade instalada, cerca de 6,7 GW em 2021 e o contínuo aumento da produção nas regiões do Litoral Norte e Seridó. Esse crescimento estimulou a instalação de parques em áreas afastadas, revelando uma necessidade premente de ampliação da rede de transmissão para evitar perdas e garantir escoamento eficiente da energia gerada.

Segundo Nascimento (2023) além da eólica, a energia solar fotovoltaica tem avançado no estado, com rápida expansão em municípios como Mossoró e Apodi, reforçando a demanda por infraestrutura elétrica adaptada. Esse cenário fortalece a motivação por

melhorias na rede principal, incluindo SE e automação, para acomodar os fluxos renováveis e promover o fornecimento estável e seguro.

O rápido crescimento de parques eólicos e solares no RN expôs a capacidade limitada da malha de transmissão existente. Os estudos de viabilidade de modelos de transmissão CC/CA para os parques offshore do estado mostram que a infraestrutura atual não atende à demanda, exigindo a adoção de soluções como linhas HVDC (High-Voltage Direct Current) para evitar sobrecargas e quedas de tensão (DANTAS, 2023).

Araújo (2024) relata que sistemas fotovoltaicos conectados à rede com transformadores de tensão variável geram fluxos de energia bidirecionais, os quais não podem ser suportados pela rede tradicional sem upgrade nos equipamentos de automação, medição e proteção. Esse cenário evidencia a urgente necessidade de reforçar a malha para garantir a qualidade do serviço e a estabilidade do sistema elétrico estadual.

O PDE elaborado pela EPE estabelece diretrizes estratégicas para o desenvolvimento da infraestrutura elétrica nacional, considerando a expansão da geração renovável, especialmente no Nordeste. O PDE destaca a importância de fortalecer a malha de transmissão para garantir o escoamento da energia gerada em regiões como o RN, assegurando a integração eficiente ao SIN (SILVA, 2022).

Além disso, o PDE orienta investimentos em SE e LT que atendam às necessidades regionais específicas, como o crescimento acelerado da energia eólica e solar no RN. Segundo Oliveira (2023), o alinhamento das políticas estaduais com o PDE é fundamental para promover a segurança energética e a sustentabilidade, impulsionando o desenvolvimento socioeconômico local por meio da expansão planejada e coordenada da infraestrutura elétrica.

2.7. Interligações Regionais

As interligações regionais são essenciais para a integração eficiente das diversas regiões do SIN, especialmente no contexto da crescente geração de energia renovável no Brasil. A EPE (2021) destaca que, no horizonte de longo prazo, é necessário fortalecer as interligações entre as regiões Norte e Nordeste com o Centro-Oeste e Sudeste, visando otimizar o escoamento da energia gerada e reduzir perdas técnicas. A expansão dessas interligações permitirá maior flexibilidade operacional e segurança energética, além de contribuir para a redução de custos operacionais e aumento da confiabilidade do sistema elétrico nacional.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para a realização da pesquisa, cujo foco é a análise da infraestrutura de LT e SE no estado do RN. A metodologia utilizada combina técnicas de geoprocessamento com levantamento e interpretação de dados técnicos e espaciais provenientes de plataformas institucionais, permitindo a identificação de elementos do sistema de transmissão e a visualização georreferenciada de usinas, SE e LT. Para isso, recorreu-se ao *software QGIS*, em conjunto com informações disponibilizadas em plataformas oficiais, como o SIGEL, mantido pela ANEEL, no *Webmap* da EPE e no IBGE. A articulação dessas ferramentas permitiu mapear, classificar e analisar os ativos do sistema de transmissão no estado, tanto existentes quanto planejados, subsidiando a compreensão da distribuição espacial e do processo de expansão da infraestrutura elétrica regional. A seguir, detalham-se as etapas e as fontes de dados utilizadas no desenvolvimento do trabalho

3.1. QGIS

O *QGIS (Quantum Geographic Information System)* é um *software* gratuito de Sistema de Informação Geográfica (SIG) que permite a visualização, edição, análise e produção de dados espaciais. Por meio de suas ferramentas, é possível manipular informações georreferenciadas, realizar análises espaciais, elaborar mapas temáticos e gerar produtos cartográficos que auxiliam na tomada de decisão em diversas áreas do conhecimento. Sua interface intuitiva, aliada à ampla compatibilidade com diferentes formatos de dados vetoriais e matriciais, torna o *QGIS* uma ferramenta essencial para profissionais e pesquisadores que atuam nas áreas de engenharia, meio ambiente, planejamento urbano, gestão de recursos naturais e estudos territoriais (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2024).

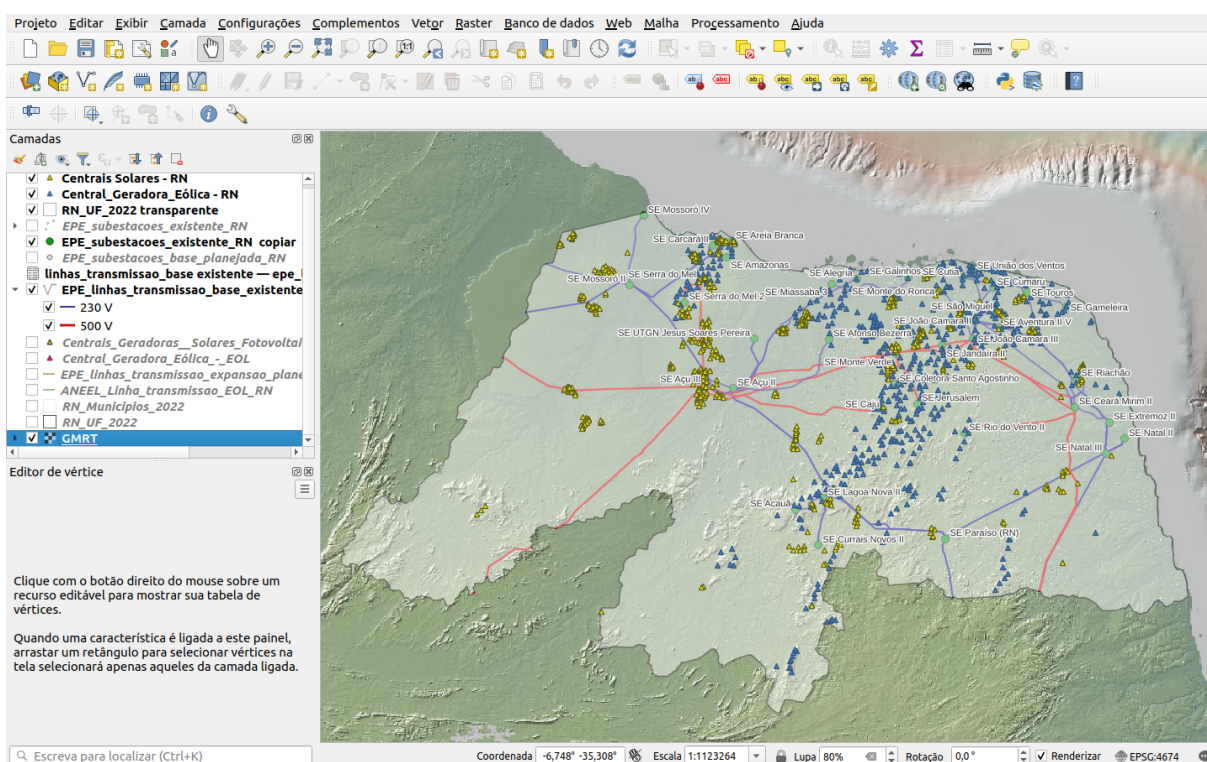
O *QGIS* é um *software* desenvolvido e mantido pela comunidade global do projeto *QGIS*, coordenada pela *QGIS.org Association*, uma organização sem fins lucrativos. O *software* é disponibilizado sob a licença *GNU General Public License (GPL)* versão 2, o que garante que ele seja livre e de código aberto, permitindo que qualquer pessoa utilize, estude, modifique e distribua suas versões (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2024).

A manutenção do *QGIS* ocorre por meio de colaborações voluntárias de desenvolvedores, além de financiamento coletivo, doações, patrocínios institucionais e contribuições de empresas e organizações parceiras. O projeto segue um cronograma de atualizações regulares, com lançamentos de versões estáveis a cada quatro meses e uma

versão de suporte de lançamento de longo prazo (LTR), indicada para projetos que exigem mais estabilidade (QGIS ASSOCIATION, 2024).

A versão utilizada neste trabalho é a *QGIS* 3.42, que oferece estabilidade aprimorada e diversas funcionalidades para processamento de dados geoespaciais, análises espaciais, criação de mapas temáticos e modelagem geográfica.

Figura 04 - Interface do aplicativo *QGIS*



Fonte: elaborado pelo autor usando o *software QGIS* (2025).

3.2. Bases de dados georreferenciados

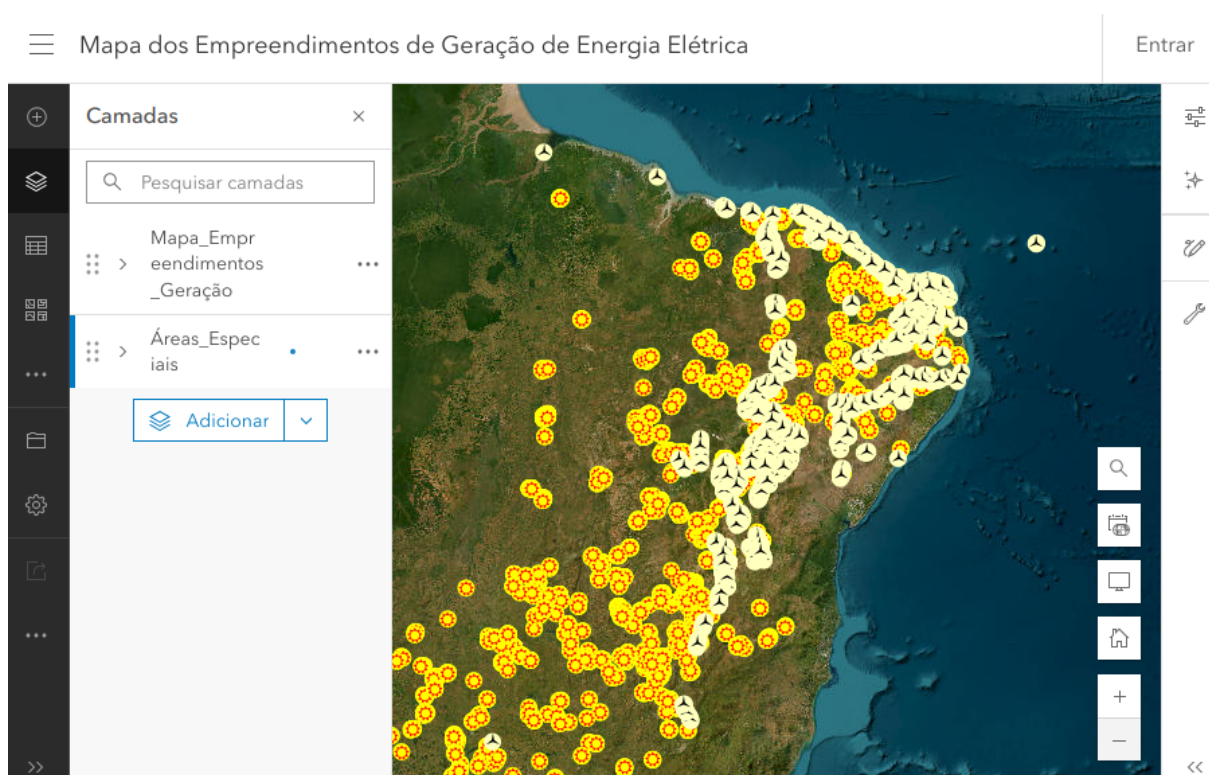
3.2.1. ANEEL - SIGEL

O Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL), desenvolvido pela ANEEL, disponibiliza uma base de dados geoespaciais que reúne informações detalhadas sobre os empreendimentos do setor elétrico brasileiro. Essa base contém dados vetoriais georreferenciados, que incluem a localização de LT, SE, usinas hidrelétricas, termoeletricas, solares, eólicas, além de empreendimentos em operação (ANEEL, 2016).

As informações são organizadas em camadas temáticas, que podem ser visualizadas no ambiente web e exportadas em formatos vetoriais compatíveis com *softwares* de

geoprocessamento, como Shapefile, GeoJSON e KML, possibilitando análises espaciais detalhadas. A base de dados do SIGEL é atualizada periodicamente, utilizando informações declaradas pelas próprias concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor elétrico, além de dados oficiais provenientes de processos de fiscalização e regulação. Além disso, instituições estaduais como o Sistema Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (Sisema-MG) confirmam que os dados disponibilizados por meio de suas plataformas têm origem direta no SIGEL, reafirmando sua função como base oficial de referência espacial do setor elétrico nacional (IDE-SISEMA, 2023; ANEEL, [s.d.]).

Figura 05 - Interface do site SIGEL



Fonte: elaborado pelo autor no site SIGEL (2025).

3.2.2. Webmap EPE

A EPE, no cumprimento de sua função institucional, gerencia e mantém um amplo conjunto de bases de dados voltadas ao planejamento da transmissão de energia elétrica. Essas bases são utilizadas como ponto de partida nos estudos desenvolvidos pela própria EPE, além de serem disponibilizadas como dados abertos. Isso permite sua livre utilização por diversos setores da sociedade, incluindo instituições governamentais, empresariais e organizações da

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e analisa os principais resultados obtidos por meio da aplicação das ferramentas e bases de dados descritas na metodologia. A pesquisa tem enfoque acerca da infraestrutura elétrica do estado do RN, com ênfase na localização, classificação e distribuição espacial de SE e LT. Os dados foram organizados, mapeados e interpretados utilizando o *software QGIS*, a partir de informações georreferenciadas disponibilizadas em plataformas institucionais como o SIGEL da ANEEL, o *Webmap* da EPE e as malhas territoriais do IBGE.

A análise desenvolvida busca compreender o arranjo técnico-territorial da rede elétrica potiguar, identificando padrões de expansão, áreas críticas e a integração entre a geração renovável e a malha de transmissão. As informações foram sistematizadas em mapas temáticos, tabelas e gráficos, permitindo uma visualização abrangente da infraestrutura atual e planejada. A seguir, são apresentados os dados referentes às SE e LT, seguidos da análise da inserção territorial das centrais geradoras renováveis.

A abordagem metodológica adotada possibilitou mapear e compreender a disposição territorial dos ativos do sistema elétrico, bem como sua relevância técnica e estratégica no contexto regional e nacional. Como proposta inovadora, esta pesquisa apresenta um estudo detalhado da malha de transmissão e das SE existentes e planejadas, subsidiar o planejamento e a expansão do sistema elétrico local. Para isso, foram utilizados dados georreferenciados de fontes oficiais, detalhados com ferramentas como o *Webmap* da EPE e o SIGEL da ANEEL. A resolução espacial dos dados combinados incluiu uma avaliação consistente da distribuição territorial dos ativos elétricos, fundamental para identificar áreas prioritárias para expansão e reforço.

4.1. Subestações - base existente

O mapa apresentado na Figura 7 mostra a localização das SE no estado do RN, as existentes e as planejadas. No mapeamento, diferentes cores são utilizadas para representar os diversos níveis de tensão, como 230 kV, 500 kV e suas combinações, o que permite identificar rapidamente a função e a capacidade operacional de cada instalação no sistema elétrico. As SE planejadas estão representadas por círculos vazios, indicando que ainda não entraram em operação, mas já integram o cronograma de expansão da infraestrutura elétrica regional. A distinção visual entre os níveis de tensão é essencial para a compreensão técnica da rede, uma vez que cada classe está associada a aplicações específicas nos processos de transmissão e distribuição de energia.

A distribuição espacial dessas SE reflete não apenas as características geográficas do estado, mas também a densidade de carga e os polos de consumo energético. Essa configuração visa otimizar a eficiência operacional da rede, reduzindo perdas e assegurando o fornecimento confiável de energia às populações urbanas e rurais. Nesse sentido, constitui uma ferramenta estratégica para o planejamento e a operação do sistema elétrico.

Observa-se uma disposição geográfica dispersa das SE, mas com concentrações notáveis em áreas estratégicas, especialmente nas regiões Leste e Nordeste do estado. Esses territórios apresentam elevada densidade de SE, dada a necessidade de suprir demandas urbanas, industriais e logísticas. A infraestrutura elétrica robusta nessas regiões favorece o crescimento econômico e melhora a confiabilidade do fornecimento.

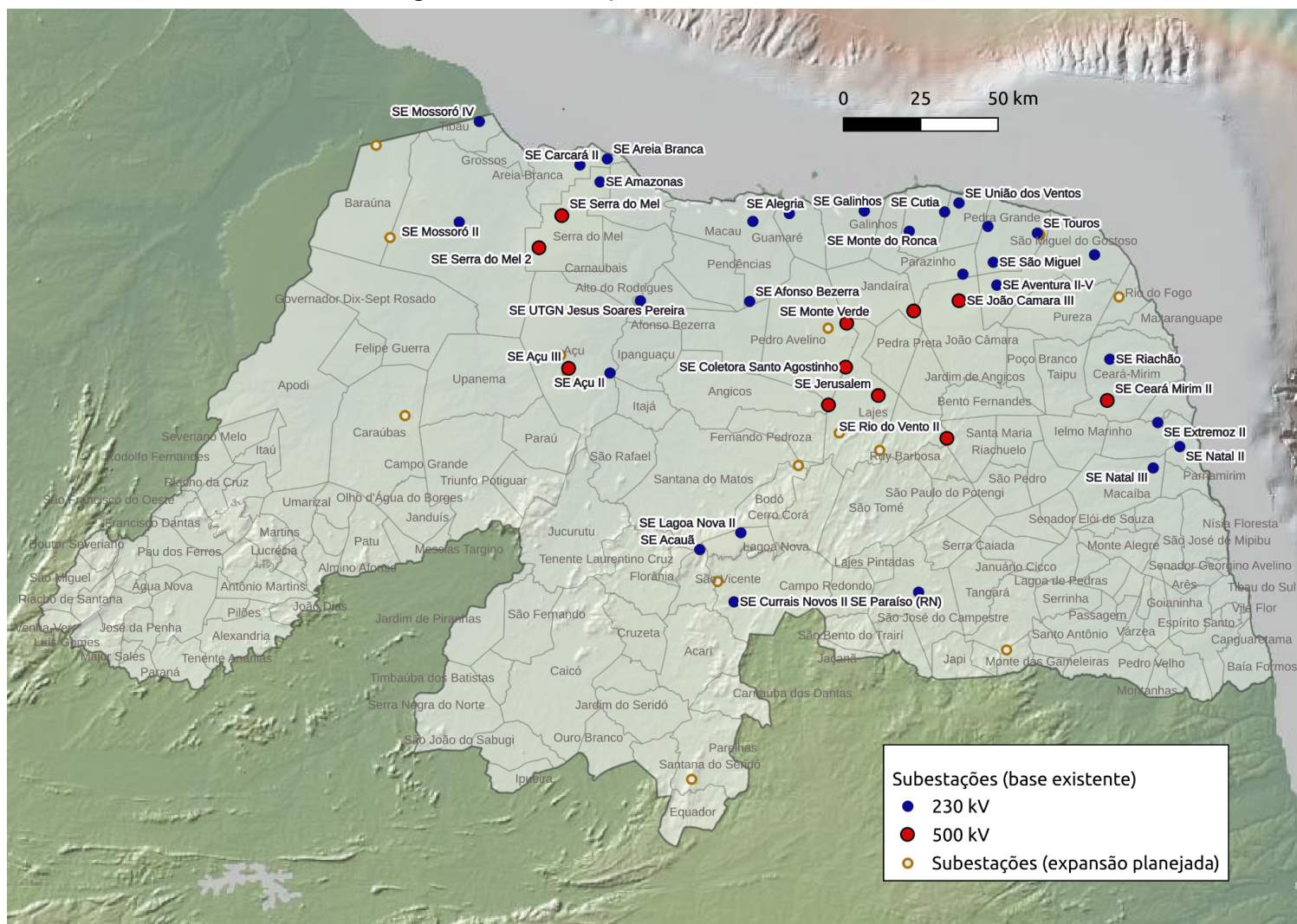
A quantificação das SE por nível de tensão revela uma diversidade de classificações, abrangendo instalações de 500 kV e 230 kV. Essa variedade é crucial para atender diferentes perfis de carga. SE de alta tensão, como as de 500 kV, são essenciais para a transmissão em longas distâncias e para a integração ao SIN, enquanto aquelas de menor tensão atendem à distribuição local e regional, inclusive em áreas rurais.

As SE de 500 kV desempenham papel estratégico na conectividade interestadual e na estabilidade do SIN. Elas permitem o transporte de grandes blocos de energia com menores perdas elétricas, além de reforçarem a segurança do sistema em cenários de alta demanda ou de contingência operacional. A análise da localização das SE planejadas, evidencia um planejamento voltado à expansão territorial da cobertura elétrica. Essas novas instalações são essenciais para atender o crescimento do consumo, especialmente em regiões interioranas ou em processo de desenvolvimento, onde ainda se observa déficit estrutural.

A projeção de cobertura energética futura indica que áreas atualmente deficitárias poderão ser beneficiadas com a inserção dessas novas SE. Um planejamento territorial adequado, aliado à ampliação da rede, contribuirá significativamente para a universalização do acesso à energia elétrica, promovendo inclusão e crescimento socioeconômico.

As novas SE possuem um papel decisivo no suporte à expansão das fontes renováveis, com o avanço da geração solar e eólica no estado, torna-se fundamental que a infraestrutura elétrica se adapte para garantir o escoamento eficiente da energia, frequentemente gerada em regiões remotas, distantes dos centros consumidores. O alinhamento da expansão da malha elétrica com áreas de alta concentração de parques renováveis, como João Câmara, Touros e Mossoró, é uma estratégia vital para maximizar o aproveitamento dessas fontes. A integração favorece a sustentabilidade ambiental, aumenta a segurança energética do sistema e impulsiona o desenvolvimento regional em consonância com a transição energética brasileira.

Figura 07 - Subestações do Rio Grande do Norte



Fonte: elaborado pelo autor usando o *software QGIS* a partir de dados do EPE *Webmap* (EPE, 2025).

Tabela 03 - Relação das Subestações Elétricas

Nome	Concessão	Ano de Operação	Tensão (kV)
SE Açú II	CHESF	-	230/138/69
SE Açú III	ATE XVII SA	2017	500/230
SE Ceará Mirim II	ETN	2014	500/230
SE Extremoz II	CHESF	2014	230/69
SE João Camara II	CHESF	2014	230
SE João Camara III	ETN	2014	500
SE Mossoró II	CHESF	-	230/69
SE Natal II	CHESF	-	230/69
SE Paraíso (RN)	CHESF	2004	230/138
SE UTGN Jesus Soares Pereira	PETROBRAS	2008	230/18
SE Natal III	CHESF	2012	230/69
SE Areia Branca	EOL MAR E TERRA	2014	230/34,5
SE Miassaba 3	BRASVENTOS MIASSABA	2014	230/34,5
SE União dos Ventos	EOL POTIGUAR	2014	230/69/34,5
SE Carcará II	CARCARÁ II	2014	230
SE Galinhos	BRASVENTOS EOLO	2014	230/34,5
SE Alegria	NEW ENERGY	2011	230/34,5
SE Mossoró IV	CHESF	2017	230/69
SE Touros	CHESF	2017	230/69
SE Lagoa Nova II	CHESF	2015	230/69
SE Riachão	QUEIROZ GALVÃO	2015	230/34,5
SE Cutia	CUTIA	2018	230/34,5
SE Amazonas	-	-	230/34,5
SE São Miguel	SM GERAÇÃO	2019	230
SE Serra do Mel	-	2020	500
SE Monte do Ronca	-	2020	230
SE Currais Novos II	RIALMA I	2013	230
SE Aventura II-V	Aventura II S.A.	2021	230
SE Gameleira	-	2021	230
SE Cumaru	-	2021	230
SE Monte Verde	-	2022	500
SE Afonso Bezerra	AFONSO BEZERRA I	2022	230
SE Jerusalem	Esperanza	2022	500
SE Coletora Santo Agostinho	ENGIE	2023	500/34,5
SE Rio do Vento II	Casa dos Ventos	2023	500/34,5
SE Jandaíra II	ARGO VI	2023	500/230
SE Caju	Ventos de Santa Tereza	2023	500
SE Serra do Mel 2	EOL POTIGUAR	2021	500
SE Acauã	ALIANÇA	2023	230

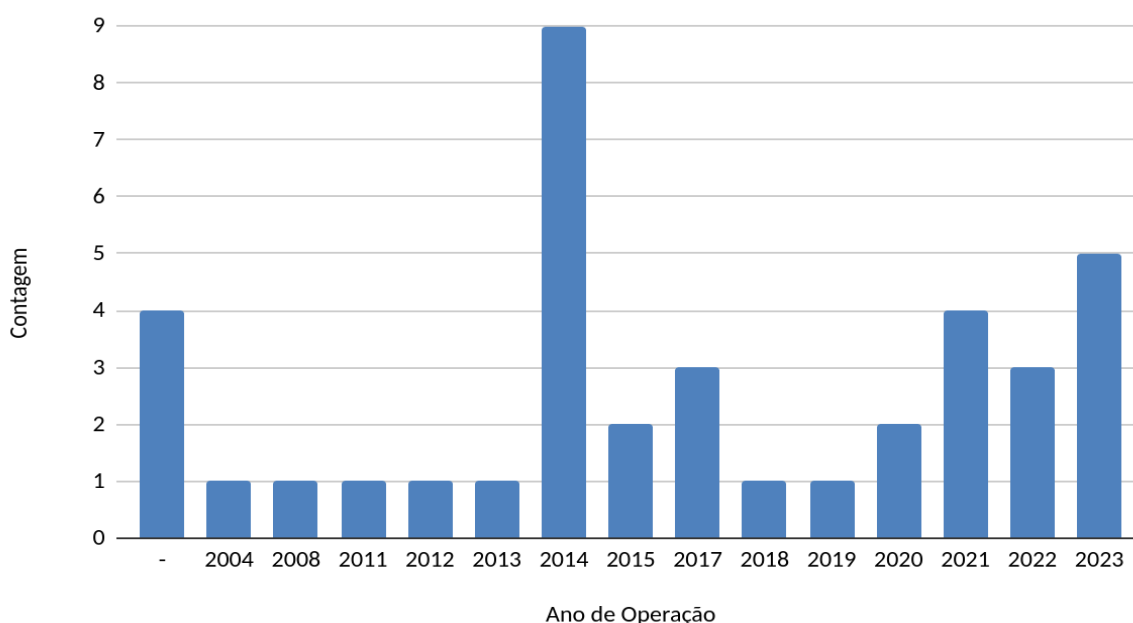
Fonte: adaptado de EPE *Webmap* (EPE, 2025)

A Tabela 03 apresenta a relação das SE localizadas na área de estudo, contendo informações sobre o nome, o ano de entrada em operação e os respectivos níveis de tensão. Os dados revelam uma distribuição temporal ampla, com empreendimentos que datam desde 2004 até 2023, indicando a continuidade de investimentos em infraestrutura elétrica na região ao longo das últimas duas décadas.

Observa-se a predominância de SE com nível de tensão de 230 kV, além de unidades com tensões combinadas, como 230/69 kV e 230/34,5 kV, as quais desempenham papel importante na interligação entre os sistemas de transmissão e distribuição. A diversidade nos níveis de tensão na tabela 03 evidencia a complexidade do sistema e a necessidade de atender demandas distintas, desde o escoamento da geração até o fornecimento em áreas urbanas e rurais.

A presença de SE recentes, como a SE Rio do Vento II, SE Jandaíra II e a SE Coletora Santo Agostinho, ambas com operação iniciada em 2023, reforça a tendência de expansão voltada à integração de novas fontes de geração, especialmente renováveis. A SE Acauã que tinha previsão de iniciar sua operação em 2023, só entrou em operação no segundo semestre do ano de 2024.

Gráfico 01 - Histograma de ano de operação das subestações



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

O histograma apresentado no gráfico 01 ilustra a distribuição temporal da entrada em operação das SE na região analisada. Nota-se um pico significativo no ano de 2014, com nove SE entrando em funcionamento, evidenciando um possível esforço concentrado de expansão da malha elétrica. Após esse período, observa-se uma relativa estabilidade, com variações moderadas ao longo dos anos seguintes. Os dados dos anos mais recentes, especialmente 2021 a 2023, indicam uma retomada no volume de novas ativações. Esse comportamento pode estar associado ao aumento da demanda energética regional e à integração de fontes renováveis ao sistema, exigindo a ampliação da infraestrutura de transmissão e distribuição.

4.2. Linhas de Transmissão - Base Existente

A malha elétrica do RN é composta principalmente por LT de 230 kV, complementadas por trechos estratégicos de 500 kV. Essa estrutura viabiliza o escoamento da energia gerada localmente, especialmente a partir de fontes renováveis, como eólica e solar, para centros de carga internos e interestaduais.

A partir do mapeamento apresentado, na figura 08, observa-se que as linhas de 230 kV, por sua vez, apresentam maior capilaridade e estão distribuídas ao longo de todo o território potiguar, conectando dezenas de SE regionais e locais. Essa infraestrutura forma uma rede de médio porte, porém de importância crítica para o escoamento da geração renovável distribuída, especialmente nas regiões interioranas.

A Tabela 04 complementa essa análise ao indicar a existência de mais de 80 trechos de linhas de 230 kV em operação no estado, com extensões variando de menos de 10 km até aproximadamente 200 km. Essa diversidade evidencia a complexidade da rede e sua adequação às condições técnicas e geográficas do RN.

As linhas de 500 kV, embora em menor número, exercem papel estratégico na interligação interestadual, conectando o RN a outros estados do Nordeste por meio de SE como Açú III, localizada na região Oeste. Essa SE é ponto de partida de três linhas de 500 kV que a conectam às SE Milagres III e Quixadá, no Ceará, e Campina Grande III, na Paraíba. Tais interligações permitem o escoamento eficiente da energia excedente gerada no estado, além de reforçarem a integração com o SIN.

A SE João Câmara III, no centro-leste do estado, constitui outro nó estratégico da rede potiguar. Conectada a diversas linhas de 230 kV, ela atua como centro de coleta da produção eólica oriunda de áreas como João Câmara, Parazinho e Galinhos, regiões com alta densidade de parques geradores. Por meio de conexões com SE como Assú II, Extremoz II,

Ceará-Mirim II e Caju, a energia é redistribuída para consumo local e também para os corredores de exportação interestadual.

Destacam-se ainda as SE Caju e Assú III, que funcionam como pontos de conexão entre diferentes regiões do estado. Caju opera como elo entre o litoral e o interior, enquanto Assú III reforça a malha no oeste potiguar, atuando como interface entre as linhas de 230 kV e as conexões de 500 kV vinculadas à Açu III. A integração entre essas SE fortalece a confiabilidade da rede, permitindo a redistribuição dinâmica dos fluxos de potência em função das condições de carga e geração.

O mapa analisado, na figura 08, revela também a existência de novas linhas e SE planejadas, com destaque para as expansões no entorno de SE estratégicas como João Câmara III, Caju e Assú III. Essas adições têm como objetivo principal aliviar os corredores atualmente sobrecarregados, aumentar a capacidade de escoamento da geração renovável e melhorar a segurança operativa do sistema. Em áreas como o oeste e o sudoeste potiguar, a implantação de novas SE e LT visa ampliar a cobertura da infraestrutura de transmissão, possibilitando a viabilização de novos projetos de geração até então inviáveis por limitações técnicas.

A presença de SE planejadas em regiões ainda pouco atendidas indica um esforço de antecipação da demanda futura. Essas unidades permitirão a modulação dos fluxos de potência e a criação de pontos adicionais de coleta de energia, aumentando a modularidade da rede. A previsão dessas expansões está em consonância com as diretrizes do Plano de Expansão da Transmissão (PET) e do PDE, os quais apontam o Nordeste como região prioritária para investimentos em infraestrutura elétrica devido à sua elevada capacidade de geração renovável.

Do ponto de vista da distribuição espacial, observa-se uma concentração significativa de SE e LT nas regiões centro-leste e litoral norte do estado. Municípios como João Câmara, Ceará-Mirim, Extremoz, Macau e Guamaré concentram infraestrutura robusta de 230 kV, voltada principalmente ao escoamento da geração renovável local. A região Oeste, embora menos densa em linhas de média tensão, abriga a SE Açu III, que cumpre papel central na exportação de energia e na conexão interestadual.

Em contrapartida, áreas como o sudoeste e o alto oeste potiguar apresentam menor densidade de infraestrutura. Nessas regiões, a presença de SE e ramais de 230 kV é mais limitada, o que impõe restrições à expansão da geração renovável. As intervenções planejadas buscam corrigir esse desequilíbrio, promovendo maior equidade territorial no acesso à infraestrutura de transmissão e ampliando a cobertura do sistema.

Tabela 04 - Relação das Linhas de Transmissão do RN

Nome	Tensão (kV)	Extensão (km)
LT 500 kV Açú III - Milagres II, C2	500	298,0
LT 500 kV Açú III - Quixadá, C1	500	230,7
LT 500 kV Campina Grande III - Ceará Mirim II C1	500	200,2
LT 230 kV Campina Grande III - Extremoz II, C2	230	199,0
LT 230 kV Campina Grande III - Extremoz II, C1	230	199,0
LT 500 kV Campina Grande III - Ceará Mirim II C2	500	198,2
LT 230 kV Banabuiú - Mossoró II, C1	230	177,6
LT 230 kV Paraíso - Açú II, C3	230	135,8
LT 500 kV Açú III - João Câmara III, C2	500	135,6
LT 230 kV Paraíso - Açú II C2	230	135,2
LT 500 kV Monte Verde - Açú III, C1	500	134,8
LT 230 kV Campina Grande II - Paraíso C1	230	123,1
LT 230 kV Campina Grande II - Paraíso C2	230	123,1
LT 230 kV Paraíso - Natal II C1	230	99,1
LT 230 kV Paraíso - Natal II C2	230	99,1
LT 500 kV Açú III - Caju, C1	500	89,8
LT 230 kV Açú III - Lagoa Nova II, C1	230	89,2
LT 230 kV Açú II - Alegria C1	230	86,1
LT 230 kV Ceará Mirim II - João Câmara II, C1	230	75,6
LT 230 kV Açú II - Miassaba 3 C1	230	74,3
LT 230 kV Alex - Mossoró II, C1	230	72,9
LT 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C2	230	69,6
LT 230 kV Açú III - Mossoró II, C2	230	65,9
LT 230 kV Lagoa Nova II - Paraíso C1	230	65,9
LT 230 kV Ceará Mirim II - João Câmara II, C2	230	65,9
LT 500 kV João Câmara III - Ceará Mirim II C1	500	64,6
LT 230 kV Açú III - Mossoró II, C1	230	64,2
LT 230 kV Ceará-Mirim II - Touros C1	230	64,1
LT 500 kV João Câmara III - Ceará Mirim II C2	500	62,4
LT 230 kV Afonso Bezerra - Açú II, C1	230	61,2
LT 230 kV Areia Branca - Mossoró II C1	230	59,4
LT 500 kV Rio do Vento II - Ceará Mirim II, C1	500	58,2
LT 500 kV Serra do Mel - Açú III, C1	500	53,3
LT 230 kV Carcará II - Mossoró II C1	230	52,8
LT 230 kV Quixeré - Mossoró II C1	230	50,3
LT 230 kV Galinhos - Miassaba 3 C1	230	42,0

LT 230 kV Mossoró II - Mossoró IV, C1	230	37,4
LT 230 kV Cutia - Touros C1	230	32,5
LT 230 kV Açú II - UTGN Jesus Soares Pereira C1	230	32,4
LT 230 kV Açú II - UTGN Jesus Soares Pereira C2	230	32,3
LT 230 kV Ceará-Mirim II - Extremoz II C2	230	31,9
LT 230 kV Monte do Ronca - João Câmara III, C1	230	30,2
LT 230 kV Extremoz II - Riachão C1	230	29,2
LT 230 kV Cumaru - João Câmara III, C1	230	28,0
LT 500 kV Jerusalem - Monte Verde, C1	500	27,5
LT 230 kV João Câmara II - União dos Ventos, C1	230	26,8
LT 230 kV Currais Novos II - Lagoa Nova II, C2 (CD)	230	25,7
LT 230 kV Currais Novos II - Lagoa Nova II, C1 (CD)	230	25,7
LT 500 kV Jandaíra II - Monte Verde, C1	500	22,8
LT 230 kV Gameleira - Touros, C1	230	20,7
LT 230 kV Ceará-Mirim II - Extremoz II C1	230	19,4
LT 230 kV Acauã - Lagoa Nova II, C1	230	18,0
LT 230 kV Açú II - Açú III, C2	230	17,9
LT 230 kV Extremoz II - Natal III, C1	230	17,2
LT 230 kV Extremoz II - Natal III, C2	230	17,1
LT 500 kV Serra do Mel - Serra do Mel 2, C1	500	16,9
LT 525 kV Coletora Santo Agostinho - SE Monte Verde, C1	500	16,7
LT 230 kV Açú II - Açú III, C1	230	16,3
LT 500 kV Jandaíra II - João Camara III, C1	500	15,5
LT 230 kV Açú II - Açú III, C1	230	15,3
LT 230 kV Carcará II - Amazonas C1	230	14,0
LT 230 kV João Camara II - São Miguel, C1	230	12,3
LT 230 kV Aventura II-V - João Camara II, C1	230	12,1
LT 230 kV Natal III - Natal II C1	230	11,8
LT 230 kV Natal III - Natal II C2	230	11,8
LT 230 kV João Câmara III - João Câmara II, C1 (CD)	230	9,3
LT 230 kV João Câmara III - João Câmara II, C2 (CD)	230	9,3
LT 230 kV Santo Inácio - Mossoró IV C1	230	9,2

Fonte: adaptado de EPE *Webmap* (EPE, 2025)

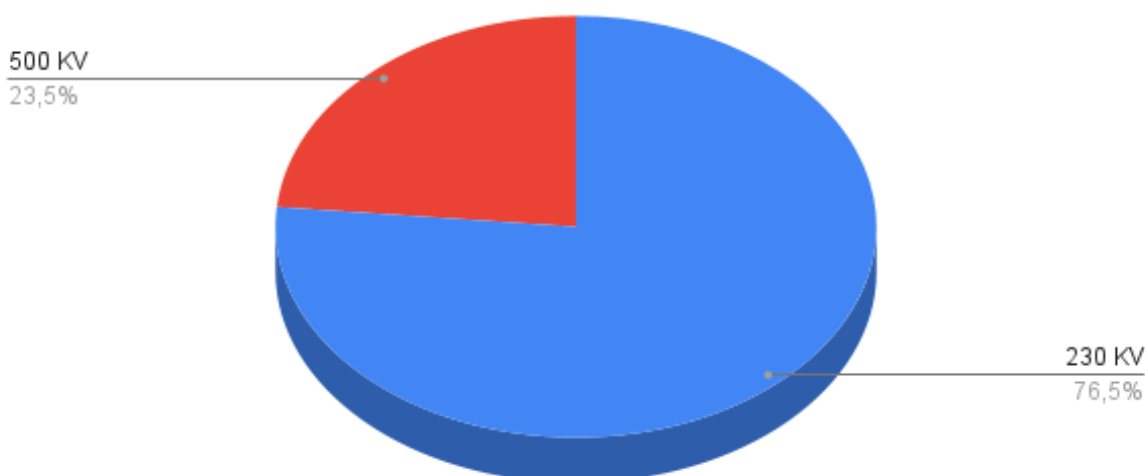
As interligações interestaduais são componentes fundamentais da infraestrutura elétrica do RN. As linhas de 500 kV que partem da SE Açú III garantem o envio de grandes blocos de energia para centros consumidores no Ceará e na Paraíba. Além disso, essas

conexões oferecem redundância e estabilidade ao SIN, permitindo o redirecionamento da geração potiguar para regiões com maior demanda em momentos de estresse no sistema. O papel do RN no contexto nacional vai além da produção energética.

O estado contribui para a segurança energética, a diversificação da matriz elétrica e a transição energética brasileira. Com uma matriz predominantemente eólica e crescente presença da solar fotovoltaica, o RN já supera sua própria demanda interna e exporta energia renovável para outras regiões do país. Essa capacidade está sustentada por uma malha de transmissão eficiente, técnica e territorialmente integrada, que posiciona o estado como elo estratégico do SIN.

Gráfico 02 - Linhas de Transmissão e Subestações do Rio Grande do Norte

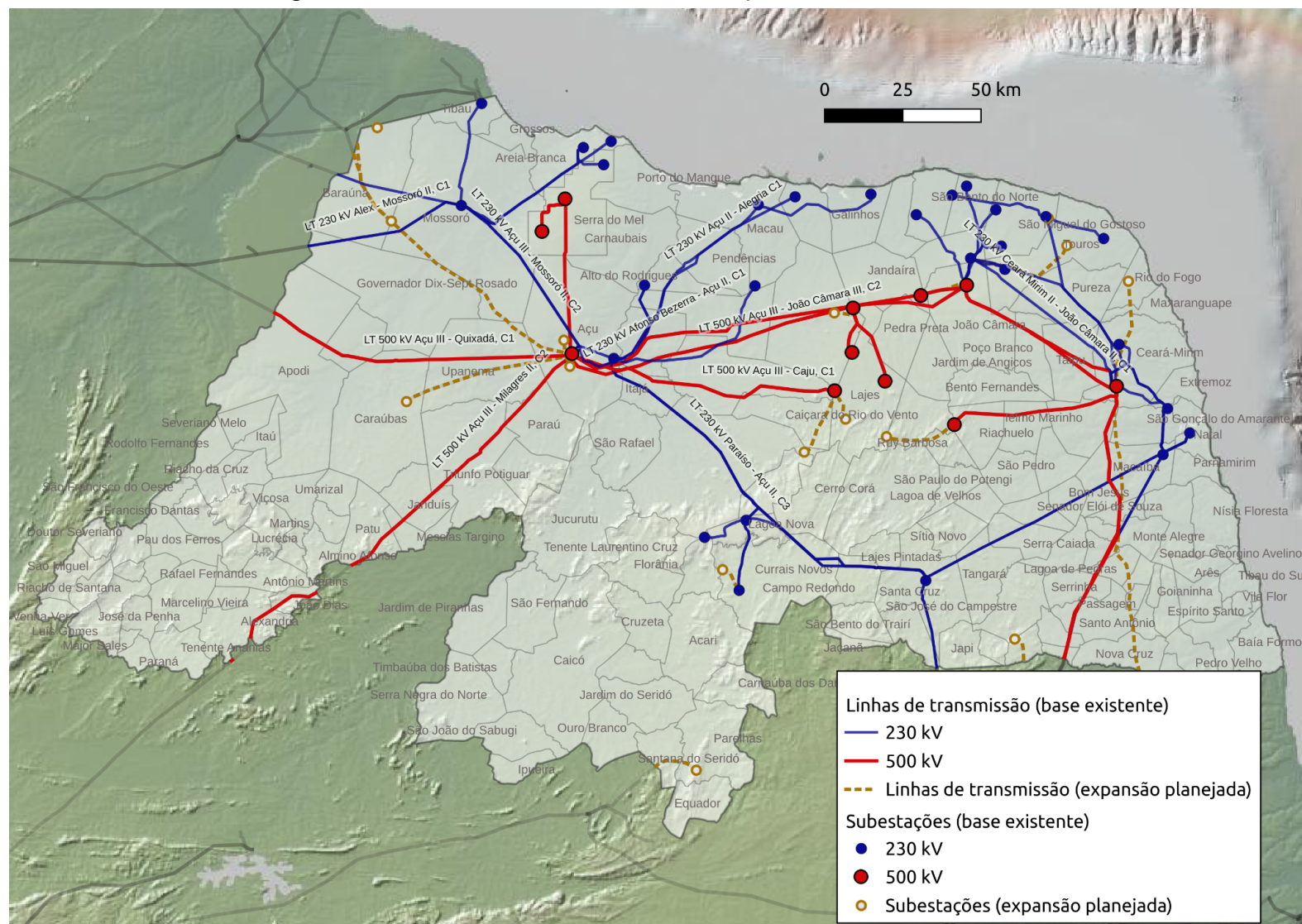
LINHAS DE TRANSMISSÃO - TENSÃO



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A predominância das linhas de 230 kV pode sugerir um foco na eficiência e na previsão econômica na distribuição de energia, considerando que tensões mais baixas podem ser mais específicas para aplicações locais ou de menor escala. O gráfico 02 é essencial para profissionais da área de engenharia elétrica e planejamento de redes, pois fornece uma visão clara da estrutura atual das LT, possibilitando decisões informadas sobre futuras expansões ou manutenções de infraestrutura.

Figura 08 - Linhas de Transmissão e Subestações do Rio Grande do Norte



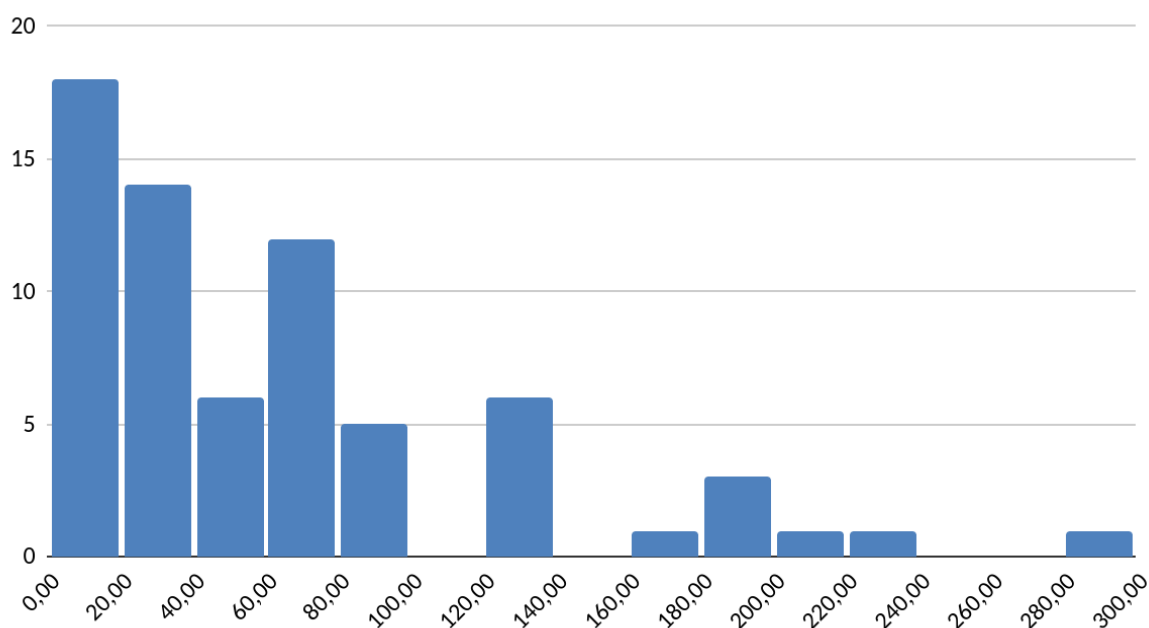
Fonte: elaborado pelo autor usando o *software* QGIS a partir de dados do EPE Webmap (EPE, 2025)

Conforme será evidenciado no gráfico 03 de barras apresentado na sequência, a extensão das LT em quilômetros, revelando um padrão notável na distribuição das distâncias. Observe-se que a categoria de 20 km possui uma frequência maior, com aproximadamente 18 registros, seguidas pelas categorias de 40 km e 60 km, que também possuem uma representatividade específica. Este padrão indica uma concentração significativa de linhas em torno dessas distâncias, o que pode sugerir a preferência ou previsão do uso de linhas com essas extensões em projetos de infraestrutura.

Além disso, as categorias com extensões superiores a 100 km apresentam um declínio acentuado na quantidade de linhas, o que sugere um aumento na utilização ou na necessidade de linhas mais longas. Essa análise pode contribuir para o entendimento do planejamento estratégico das redes de transmissão, evidenciando onde se concentra a maior parte da infraestrutura e coloca áreas possíveis para melhoria ou expansão.

Gráfico 03 - Extensão das Linhas de Transmissão

Linhas de Transmissão - Extensão (km)



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

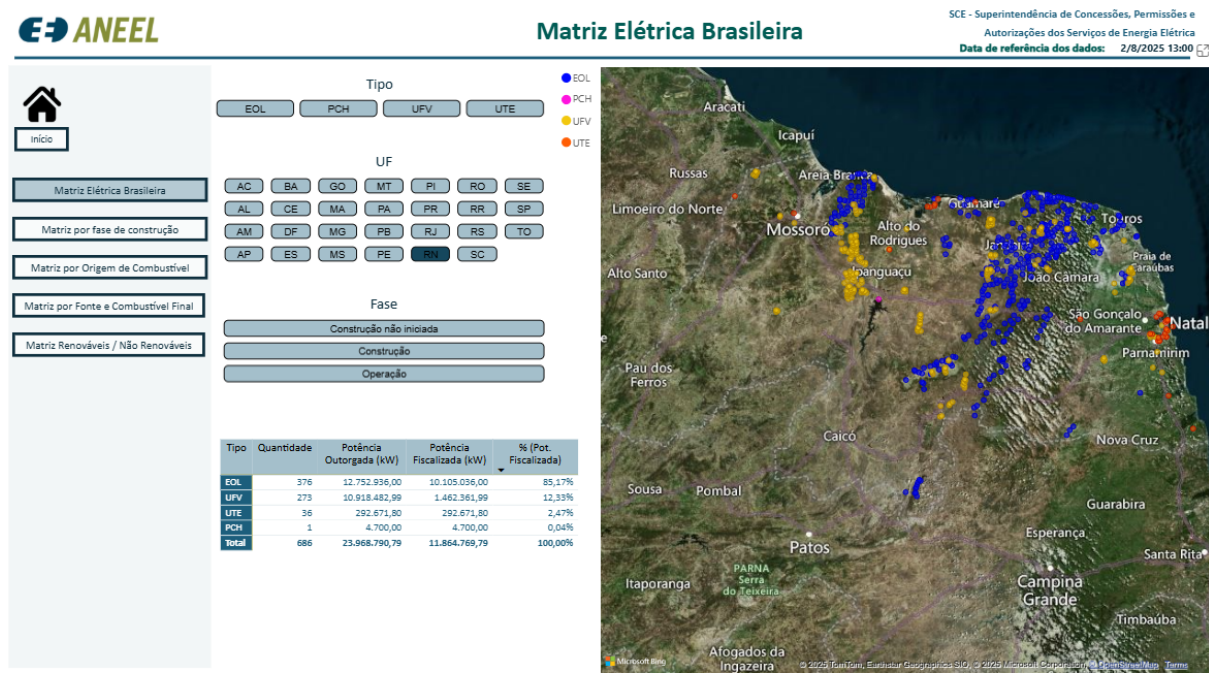
4.3. Geração de Energia Sustentável e Infraestrutura Energética

A rede elétrica potiguar desempenha uma função estratégica no contexto da geração renovável, desempenhando um papel fundamental entre os centros produtores e o SIN. O mapeamento realizado evidenciou uma forte correlação espacial entre a localização das SE e

LT e os principais polos de geração renovável no estado. Regiões como João Câmara, Touros, Parazinho, Açú e Lajes concentram um elevado número de empreendimentos geradores, com inserção direta na malha de 230 kV e, em casos estratégicos, na rede de 500 kV. Essa disposição territorial reforça a importância de um planejamento energético integrado, que considera tanto a oferta de recursos naturais quanto a capacidade técnica de escoamento.

Uma análise desenvolvida ao longo deste trabalho permitiu identificar os principais traços da infraestrutura elétrica do RN, com base em dados georreferenciados e interpretações espaciais. Os resultados demonstram a existência de uma rede técnica relativamente consolidada em determinadas regiões, mas ainda desigual em termos de cobertura territorial. A visualização integrada das SE, LT e centrais de geração evidenciou padrões de concentração, deficiências estruturais e oportunidades de reforço da malha. O estudo destacou a função estratégica do estado no contexto do SIN, especialmente no escoamento da geração renovável.

Figura 09 - Distribuição geográfica das usinas no RN



Fonte: ANEEL, (2025)

Conforme mostra a figura 09, observa-se a concentração de empreendimentos de geração renovável, especialmente eólica (em azul) e solar fotovoltaica (em amarelo), nas regiões de João Câmara, Touros, Mossoró, Assú e Alto do Rodrigues, evidenciando a pressão por reforços na malha de transmissão de energia elétrica no RN.

Além da caracterização técnica da rede, a pesquisa também discute a funcionalidade e a eficiência da infraestrutura instalada, considerando sua capacidade de atender às demandas atuais e futuras. Foram avaliadas as condições de operação dos ativos do sistema e sua capacidade de suportar a injeção crescente de energia oriunda de fontes renováveis, que ganharam destaque no cenário energético potiguar.

A figura 10 ilustra a distribuição espacial das centrais de geração renovável no RN, permitindo uma análise precisa da ocupação territorial pelas fontes eólica e solar. Além de possibilitar a identificação clara da localização das usinas, é possível visualizar a sua integração com a infraestrutura elétrica vigente e projetada no estado. Nela, são representadas as usinas solares por triângulos amarelos e as usinas eólicas por triângulos azuis. Essa diferenciação visual facilita a interpretação dos padrões de ocupação do território pelas distintas fontes de energia.

Observa-se uma clara predominância de empreendimentos eólicos concentrados no centro-norte do estado. Regiões como João Câmara, Parazinho, Lajes e Touros se destacam por abrigarem um elevado número de centrais eólicas, reflexo do grande potencial de ventos regulares nessa faixa do território potiguar. Essa concentração contribui para consolidar o RN como referência nacional na geração eólica.

Por sua vez, as usinas solares apresentam uma distribuição mais dispersa, com presença significativa em regiões do interior e do semiárido. Essa característica está relacionada à ampla disponibilidade de radiação solar nessas áreas, permitindo o aproveitamento eficiente da fonte fotovoltaica mesmo em localidades mais afastadas dos grandes centros consumidores.

Há também áreas onde se verifica a coexistência das duas fontes, notadamente nos entornos de João Câmara e Açu. Nessas zonas, a presença simultânea de empreendimentos eólicos e solares evidencia uma estratégia de aproveitamento híbrido dos recursos naturais disponíveis, favorecendo a complementaridade entre as fontes intermitentes.

Outro ponto relevante é a proximidade de grande parte dessas centrais com a infraestrutura elétrica existente. A maioria dos empreendimentos encontra-se conectada ou próxima a SE e LT, o que possibilita o escoamento eficiente da energia gerada. Essa distribuição indica uma sinergia entre a localização dos projetos e a capacidade técnica da rede.

Na região de Açu, por exemplo, destaca-se a presença da SE Açu III, um dos principais nós da malha elétrica do estado. A concentração de empreendimentos no entorno

dessa instalação se justifica pela presença de linhas de 500 kV que interligam o RN a outros estados, facilitando a exportação da energia gerada localmente.

A distribuição atual das SE e LT reflete uma lógica de encaminhamento da expansão econômica e da instalação de empreendimentos de geração renovável. As SE de 230 kV são predominantes, organizadas em torno de eixos de demanda e produção energética. As LT que as conectam apresentam grande capilaridade, viabilizando a integração regional da rede. As instalações de 500 kV, embora em menor número, representam uma estrutura de suporte de maior capacidade e alcance, garantindo a transferência de grandes blocos de energia para fora do estado.

O mapeamento apresentado na figura 10 também evidencia a importância do planejamento conjunto entre geração e transmissão. Nas áreas onde esse alinhamento ocorre, há um uso mais racional da infraestrutura disponível, com menores perdas e maior confiabilidade no escoamento da energia. Esse modelo de integração fortalece a resiliência do sistema frente às variações de produção típicas das fontes renováveis.

Adicionalmente, observa-se a presença de LT planejadas, sinalizadas na figura 10 como parte da expansão futura da rede. Essas novas conexões visam ampliar a capacidade de atendimento em regiões ainda pouco conectadas, especialmente no oeste e no sul do estado, onde há usinas em operação ou em fase de construção que carecem de infraestrutura adequada.

A ampliação da rede nessas áreas têm potencial para destravar projetos atualmente inviáveis por restrições de escoamento. Ao garantir o acesso dessas regiões ao SIN, amplia-se a cobertura energética e incentiva o desenvolvimento de novos empreendimentos renováveis em áreas antes negligenciadas.

Em síntese, a disposição espacial das centrais renováveis, associada à infraestrutura existente e planejada, revela um arranjo técnico coerente e estratégico. A figura analisada demonstra não apenas o cenário atual de ocupação do território por fontes renováveis, mas também as direções futuras da expansão elétrica no RN. Esse panorama reforça o papel do estado como protagonista da transição energética brasileira, ao alinhar o crescimento da geração renovável com o fortalecimento da rede de transmissão, promovendo uma matriz mais sustentável, resiliente e integrada ao sistema elétrico nacional.

Fonte: elaborado pelo autor usando o *software QGIS* a partir de dados do EPE *Webmap* (EPE, 2025).

Ao longo do trabalho, foram identificados os principais elementos que compõem a malha elétrica potiguar, distinguindo as instalações em operação daquelas ainda em fase de planejamento. A análise espacial dessas infraestruturas permitiu visualizar padrões de concentração e carência estrutural, além de avaliar o grau de integração entre a rede existente e os empreendimentos de geração renovável em expansão no estado. Essas informações são essenciais para subsidiar decisões de planejamento energético e políticas públicas externas ao desenvolvimento sustentável da matriz elétrica regional.

No que se refere à integração com o SIN, os resultados indicam uma atuação expressiva do estado como exportador líquido de energia. As SE Açu III, João Câmara III e Ceará-Mirim II destacam-se como pontos de interconexão entre o sistema elétrico potiguar e os estados vizinhos. As linhas de 500 kV conectam o RN a SE de importância regional, como Milagres III (CE), Quixadá (CE) e Campina Grande III (PB), consolidando um corredor de escoamento fundamental para a estabilidade e segurança energética da região Nordeste.

Entretanto, uma análise espacial revelou zonas de elevada densidade de infraestrutura coexistindo com áreas marcadas por um evidente déficit estrutural. Enquanto regiões como Leste, Centro-Leste e parte do Litoral Norte concentram grande parte das SE e linhas, outras áreas, notadamente o Alto Oeste, o Semiárido Central e o Sudoeste, apresentam cobertura limitada. Essa desigualdade compromete o aproveitamento pleno do potencial renovável nessas regiões e evidencia a necessidade de expansão territorial da rede para fins de equidade energética e desenvolvimento regional.

Esses achados apontam para uma malha elétrica que, embora robusta em alguns pontos, ainda carece de complementação para atender de forma mais uniforme à diversidade territorial do estado. A concentração de ativos em regiões já consolidadas limita a expansão para áreas emergentes, que dependem de investimentos direcionados. O mapeamento realizado contribui para uma compreensão ampla dos padrões de cobertura e para a identificação de áreas prioritárias de reforço.

Determinadas SE e trechos de linha se destacam como nós críticos na estrutura de transmissão estadual, dada sua capacidade de conectar grandes volumes de geração renovável à rede nacional. A SE Açu III, por exemplo, atua como ponto de escoamento de diversos empreendimentos da região Oeste, conectando-se a linhas de 500 kV com destino ao Ceará e à Paraíba. Já João Câmara III concentra o fluxo proveniente de uma das regiões com maior densidade eólica do país, ocasionando de centro de convergência entre diversas SE discutidas e o sistema nacional. A SE Caju, por sua vez, desempenha papel articulador entre o Litoral Norte e o interior do estado, favorecendo a redistribuição dos fluxos de potência.

A atuação dessas estruturas críticas não se limita ao escoamento local; elas garantem a inserção estável e confiável da geração potiguar no SIN, contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda em nível nacional. Além disso, possibilita que a energia excedente gerada no estado seja exportada para regiões com menor capacidade instalada, colaborando para a segurança energética do Brasil. O desempenho adequado dessas interligações depende, contudo, de constantes investimentos em manutenção, modernização e ampliação das instalações existentes.

As SE planejadas, indicadas ao longo do trabalho, demonstram um direcionamento para ampliar a cobertura em áreas com crescimento acelerado da geração renovável. O avanço da geração solar fotovoltaica em regiões interioranas, como o Sudoeste e o Seridó, exige a criação de novas redes e a modernização da infraestrutura existente. A presença de SE em construção ou em fase de licenciamento nessas áreas evidencia a tentativa de antecipar gargalos operacionais e permitir que a energia gerada seja integrada ao SIN.

Apesar da importância estratégica da infraestrutura elétrica potiguar e dos avanços registrados nos últimos anos, a pesquisa evidenciou desafios importantes que ainda limitam a plena eficiência do sistema. Um dos principais entraves é o descompasso entre a expansão acelerada dos empreendimentos de geração renovável e a implementação das obras de transmissão de permissão ao escoamento dessa energia. Em muitos casos, os parques eólicos e solares são concluídos antes da finalização das SE e linhas correspondentes, resultando na subutilização da capacidade instalada e prejuízos financeiros para investidores e para o setor elétrico como um todo.

Esse descompasso é especialmente crítico em regiões com forte potencial de geração, mas cuja infraestrutura de transmissão ainda é insuficiente ou inexistente. O tempo médio entre o leilão da geração e a entrada na operação das linhas ainda é elevado, dificultando o aproveitamento eficiente da energia produzida. Essa lacuna decorre, em parte, da complexidade dos processos de licenciamento ambiental, da sobrecarga regulatória e de entraves operacionais no setor de transmissão. Como consequência, parte significativa da geração renovável no RN ainda depende de redes locais de menor capacidade, restringindo sua inserção plena no SIN.

Outro desafio relevante diz respeito à carência de infraestrutura em áreas ainda atendidas, particularmente nas regiões interioranas do estado. O mapeamento evidenciou uma concentração de SE e linhas nas regiões Leste e Nordeste, enquanto o Oeste e o Semiárido Central apresentam baixa densidade de ativos elétricos. Essa distribuição desigual

compromete não apenas a universalização do acesso à energia, mas também a capacidade de interiorização dos investimentos em geração e de desenvolvimento socioeconômico regional.

Superar esses desafios exige ações coordenadas entre os agentes do setor, com reforço na articulação entre os processos de planejamento da geração e da transmissão. A sincronização entre os cronogramas de ambos os segmentos é essencial para garantir que a energia produzida possa ser plenamente aproveitada, beneficiando tanto os produtores quanto o sistema elétrico nacional. Essa questão é ainda mais sensível no contexto da transição energética, em que fontes intermitentes, como a eólica e a solar, exigem redes robustas, confiáveis e adaptáveis para garantir estabilidade e segurança não adequadas.

Com base nesses desafios, destaca-se a urgência de um planejamento mais integrado entre os segmentos de geração e transmissão de energia elétrica. A falta de sincronia entre a entrada na operação de novos empreendimentos de geração renovável e a disponibilidade de infraestrutura de escoamento tem gerado impactos significativos na eficiência do sistema. Para mitigar esse problema, é fundamental que os estudos de previsões e os cronogramas de ambos os setores sejam articulados desde as fases iniciais do processo.

Outro aspecto relevante é o fortalecimento do uso de ferramentas geoespaciais no planejamento energético. O trabalho do QGIS nesta pesquisa demonstrou seu potencial na visualização, análise e interpretação dos dados territoriais, permitindo uma compreensão aprofundada da distribuição da infraestrutura elétrica no estado. A adoção sistemática dessas ferramentas por órgãos governamentais, administrações e empresas do setor pode melhorar significativamente a qualidade dos diagnósticos e decisões, especialmente quando integradas às bases de dados públicas e atualizadas, como o SIGEL, o *Webmap* da EPE e os mapas do IBGE.

A combinação entre planejamento integrado e uso de tecnologias de geoprocessamento pode representar um salto de qualidade na governança da infraestrutura elétrica brasileira, especialmente em contextos regionais como o do RN, onde os desafios espaciais são determinantes para a efetividade das políticas energéticas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais desta monografia têm como objetivo sintetizar os principais achados da pesquisa sobre a infraestrutura das LT e SE no estado do RN. O estudo se baseia na análise de dados georreferenciados provenientes de fontes institucionais confiáveis, integrados por meio de ferramentas de geoprocessamento, como o QGIS.

A pesquisa buscou responder à questão central que norteia o estudo: **“Quais as especificações e estratégias para a tomada de decisão sobre as localizações das linhas de transmissão e subestações no estado do Rio Grande do Norte?”**.

Esta seção final apresenta uma reflexão crítica sobre os resultados obtidos, enfatizando sua relevância para o desenvolvimento do setor elétrico no RN. São sintetizadas as evidências observadas quanto à distribuição territorial, à conectividade com o SIN e à importância estratégica da infraestrutura local para o escoamento da geração renovável. Além disso, discutimos os desafios identificados, as oportunidades de melhoria e as perspectivas para a expansão futura da rede elétrica estadual.

Em resumo, os principais resultados confirmam que o RN possui uma infraestrutura elétrica em crescimento e com capacidade técnica relevante, mas enfrenta desafios relacionados à distribuição espacial e à sincronia entre geração e transmissão. A continuidade desse processo de expansão não exigiu apenas investimentos financeiros, mas também estratégias coordenadas de planejamento territorial, considerando critérios técnicos, socioeconômicos e ambientais.

Dessa forma, a infraestrutura elétrica do RN não apenas sustenta a geração renovável local, mas é projetada como elemento-chave na transição energética brasileira. Ao garantir o escoamento eficiente da energia limpa produzida em seu território, o estado fortalece sua posição como protagonista no cenário energético nacional, ao mesmo tempo em que amplia as oportunidades de desenvolvimento regional e diversificação econômica.

A realização de leilões de transmissão mais coordenados com os leilões de geração, bem como o fortalecimento do papel das instituições de planejamento, como a EPE, é uma estratégia necessária para garantir maior previsibilidade ao setor. Além disso, a adoção de modelos dinâmicos de expansão, que consideram cenários de crescimento da demanda e da oferta regional, pode contribuir para reduzir o risco de gargalos futuros e aumentar a segurança operacional do SIN.

O panorama analisado nesta monografia indica uma tendência clara de expansão da infraestrutura elétrica no RN, impulsionada principalmente pelo crescimento contínuo da

geração renovável. A projeção para os próximos anos é de que a malha de transmissão se amplie em direção a regiões ainda pouco atendidas, especialmente no interior do estado, como forma de viabilizar a instalação de novos empreendimentos de energia solar e eólica.

Além da expansão física, espera-se também um processo de modernização tecnológica das redes existentes, com a adoção de soluções mais eficientes para monitoramento, operação e controle. O uso de tecnologias inteligentes, como sistemas SCADA, automação de SE e análise em tempo real de carga e geração, deverá se intensificar, aumentando a confiabilidade e a flexibilidade da malha elétrica estadual.

Para sustentar esse processo de expansão e modernização, será fundamental o acompanhamento contínuo dos dados técnicos e regulatórios disponibilizados por instituições como a ANEEL, a EPE e o ONS. A consulta periódica às bases de dados oficiais permite não apenas o monitoramento da infraestrutura existente e planejada, mas também a antecipação de tendências, gargalos e oportunidades de investimento.

Nesse cenário, as perspectivas para o setor elétrico do RN são promissoras, desde que sustentadas por um planejamento integrado, orientado por dados e por uma cultura de inovação contínua. Com potencial para consolidar sua liderança na geração renovável do país, o estado depende de uma articulação eficaz entre os agentes públicos, privados e reguladores. O fortalecimento dessa cooperação será decisivo para transformar o potencial técnico identificado nesta pesquisa em benefícios reais à população, ao desenvolvimento regional e à transição energética brasileira.

Para estudos futuros, sugere-se uma aplicação integrada das ferramentas de geoprocessamento para análise da expansão da malha de transmissão em outras regiões do país; a avaliação do impacto das novas fontes renováveis no planejamento das SE; o desenvolvimento de modelos preditivos para identificação de pontos críticos e gargalos na infraestrutura elétrica potiguar; a investigação do potencial e dos desafios da automação e dos sistemas inteligentes na modernização das redes locais; estudos sobre a integração de microgeração distribuída nas áreas urbanas e rurais do estado; o desenvolvimento de modelos preditivos para identificação de pontos críticos na infraestrutura elétrica do RN; além da análise dos impactos socioambientais decorrentes da expansão da infraestrutura elétrica, com foco na sustentabilidade e inclusão energética das populações do Semiárido e Alto Oeste potiguares.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão*. Rio de Janeiro, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 4. ed. Brasília: Aneel, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Estabelecimento das Receitas Anuais Permitidas (RAP) vinculadas às concessionárias de transmissão para o ciclo 2024-2025*. Brasília: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/nreh20243348.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Informações Geográficas do Setor Elétrico Brasileiro*. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/informacoes-geograficas-do-setor-eletrico-brasileiro/pop_up?_101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6_viewMode=print. Acesso em: 30 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Mapa dos empreendimentos de geração de energia elétrica*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, [s.d.]. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=45374c61bd3e40e3a484878003fae937>. Acesso em: 30 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Matriz Elétrica Brasileira*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2025. Disponível em: [https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNGE3NjVmYjAtNDZmOWI4LWVjYTctNDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzZAxNzBlMSIsImMiOiR9](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNGE3NjVmYjAtNDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzZAxNzBlMSIsImMiOiR9). Acesso em: 30 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Nota Técnica 0075/2011-SDR/ANEEL*. Brasília: Aneel, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico de Nacional – PRODIST*. Brasília: Aneel, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL)*. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=45374c61bd3e40e3a484878003fae937>. Acesso em: 05 jun. 2025.

ALMEIDA, F. R.; LIMA, M. H. Subestações elétricas e seus arranjos: análise da confiabilidade e flexibilidade operacional. *Revista Brasileira de Energia*, v. 27, n. 2, p. 43–56, 2021.

ANDRADE, Alenuska Kelly Guimarães. *A eletricidade chega à cidade: inovação técnica e a vida urbana em Natal (1911–1940)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

ARAÚJO, J. M. O. C. de. *Análise do impacto da geração distribuída nos níveis de tensão em redes de distribuição: estudo de caso na implementação de um transformador de distribuição com TAP variável em uma concessionária de energia*. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/59606>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ARAÚJO, M. A. A. de. *Território, técnica e eletrificação: as novas configurações do circuito espacial de produção de energia elétrica no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil*. 2019. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/28777>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ARAÚJO, P. G. M. *Energia elétrica no Nordeste Brasileiro: Das primeiras termelétricas às usinas fotovoltaicas e eólicas*. PROCONDEL, SUDENDE, 2015, 24p

ARAÚJO, R. S. de. et al. Fontes de energia renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre práticas sustentáveis. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.], v. 11, pág. e468111133893, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33893. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/33893>. Acesso em: 14 mai. 2025.

BRASIL. *Decreto nº 8.437, de 22 de abril de 2015*. Regulamenta o disposto no art. 7º, caput, inciso XIV, alínea “h”, e parágrafo único, da Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011, para estabelecer as tipologias de empreendimentos e atividades cujo licenciamento ambiental será de competência da União. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/decreto/d8437.htm. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL. *Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011*. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL. *Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998*. Altera dispositivos das Leis no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 8.666, de 21 de junho de 1993, no 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, no 9.074, de 7 de julho de 1995, no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e autoriza o Poder Executivo a promover a reestruturação das Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS e de suas subsidiárias e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 maio 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9648cons.htm. Acesso em: 9 jun. 2025.

BRASIL. *Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004*. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL. *Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996*. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19427cons.htm. Acesso em: 11 jun. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2034*. Brasília: MME/EPE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2034>. Acesso em: 5 jun. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Plano de Outorgas de Transmissão de Energia Elétrica – POTE 2024 (2ª emissão)*. Brasília: MME, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-de-outorgas-de-transmissao-de-energia-eletrica-potee/documentos/2024-2/portaria_sntep_mme_2868_2024_potee_2024_2_emissao.pdf/view. Acesso em: 09 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. *NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade*. Brasília: MTE, 2004.

CABRAL, M. M. C. *Blecautes em Sistemas de Energia Elétrica: Um levantamento das principais causas*. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

CAMPOS, V. F.; REZENDE, R. L. A importância das subestações de manobra para a confiabilidade do sistema elétrico. *Revista Engenharia Elétrica em Foco*, v. 8, n. 1, p. 21–30, 2020.

CARDOSO, A.; JÚNIOR LAMOUNIER, E. A.; BARCELOS, M. A. Ferramentas de apoio ao ensino de componentes de subestações de energia elétrica com uso de realidade virtual e aumentada. *Revista Iniciação Científica, Tecnologia e Artística - SENAC*. São Paulo: SENAC - Revista Contextos, 2014. Disponível em: <https://www1.sp.senac.br/hotsites/blogs/revistainiciacao/index.php/ferramentas-de-apoio-ao-e>

nsino-de-componentes-de-subestacoes-de-energia-eletrica-com-uso-de-realidade-virtual-e-aumentada/ . Acesso em: 2 ago. 2025.

CARVALHO, J. M.; FERREIRA, P. A. Arranjos de barramentos em subestações: critérios técnicos e operacionais. *Revista de Engenharia Elétrica Aplicada*, v. 17, n. 2, p. 101–112, 2019.

CARVALHO, J. F.; FERREIRA, M. A. F. *Engenharia de linhas de transmissão: fundamentos, projetos e construções*. São Paulo: Edgard Blücher, 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986*. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Brasília, 1986. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>. Acesso em: 11 jun. 2025.

CUNHA, L. P.; BARROS, F. M. *Impactos ambientais em obras de transmissão de energia elétrica: estudos e licenciamento*. Revista Brasileira de Energia, Brasília, v. 26, n. 2, p. 78-93, 2021.

DANTAS, L. A. V. S. *Análise de viabilidade dos modelos de transmissão CC/CA em parques eólicos offshore*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53757>. Acesso em: 11 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Bases de Dados de Simulação*. s.d. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/bases-de-dados-de-simulacao> . Acesso em: 5 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Caderno de Transmissão – Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (PDE 2026)*. Brasília: EPE, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-transmissao-pde-2033>. Acesso em: 06 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Expansão das Interligações Regionais – Diagnóstico Inicial*. Nota Técnica EPE-DEE-NT-072/2021, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-618/EPE-DEE-NT-072-2021-r0-Expansao%20das%20Interligacoes%20Regionais%20-%20Diagnostic.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Investimentos em Transmissão devem ultrapassar R\$ 128 bilhões até 2034*. Eixos EPE, 2024b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/nota-de-esclarecimento-jornalistica-04-2025>. Acesso em: 09 jun. 2025

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Nova versão do WEBMAP EPE – Sistema interativo de geoinformação do setor energético brasileiro*. Brasília, s.d. . Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/webmap-epe>. Acesso em: 16 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 – PDE 2034*. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: [epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034). Acesso em: 10 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Programa de Expansão da Transmissão (PET/PELP) – Ciclo 2024, 2º Semestre*. Brasília: EPE, 2024d. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-866/01.Relat%C3%B3rio%20PET-PELP%20o%20Sem2024%20-%20EPE-DEE-RE-098_2024.pdf. Acesso em: 06 jun. 2025.

FERREIRA, M. C. L. M. *Rio de placas? A expansão da geração centralizada de energia solar fotovoltaica no RN*. 2019. Dissertação (Mestrado em Estudos Urbanos e Regionais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/48425>. Acesso em: 11 jun. 2025.

GOLDEMBERG, J., CHU, S. *Um futuro com energia sustentável: Iluminando o Caminho*. FAPESP, Inter Academy Council. 2010.

HOSENUZZAMAN, M. et al. *Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, n. 41, p. 284–297, jan. 2015.

IDE-SISEMA. *Usinas Termelétricas (UTES) – Metadados*. Belo Horizonte: Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais, 2023. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/geonetwork/api/records/709dee1f-1c38-4d98-9817-193fd5eb56fd> . Acesso em: 30 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). *Licenciamento Ambiental Federal*. Brasília: IBAMA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Malhas territoriais*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html> . Acesso em: 5 jun. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/td2680>. Acesso em: 17 mai. 2025.

LEITÃO, G. L. C. *Análise de Fatores Críticos de Sucesso na Gestão de Segurança em Atividades de Manutenção de Linha Viva em Transmissão em Ultra-Alta Tensão*. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) - Universidade Federal do Fluminense, Niterói, 2014.

LIMA, G. M. B. et al. *Energia eólica no Rio Grande do Norte: evolução e perspectivas. Espaço e Economia*, v. 27, 2024. Disponível em: <http://journals.openedition.org/espacoeconomia/27598>. DOI: 10.4000/12ge1. Acesso em: 11 jun. 2025.

LIU, H. et al. Impact of Green financing, FinTech, and financial inclusion on energy efficiency. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, 27 out. 2021.

LOSEKANN, L.; TAVARES, A. Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural. **Texto Para Discussão**, [S.L.], p. 1-69, 3 ago. 2021.

LOSEKANN, L.; HALLACK, M. C. M. Novas energias renováveis no Brasil : desafios e oportunidades. 2018. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/8325>. Acesso em: 05 jun. 2025.

MARTINS, A. C.; GONÇALVES, T. H. *Linhas de transmissão: tecnologias, estruturas e desempenho*. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2020.

MELO, E. A. de O. *Geração de energia eólica onshore no Rio Grande do Norte: uma avaliação sobre o emprego formal e arrecadação tributária*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38057>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MEMÓRIA DA ELETRICIDADE. Chesf: 70 anos de história. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade, 2018.

MORAES, R. C.; SILVA, F. H. Aplicações e desempenho de disjuntores a SF₆ no sistema de transmissão brasileiro. *Revista Brasileira de Energia Elétrica*, v. 25, n. 3, p. 67–78, 2020.

MOURA, A. L.; NASCIMENTO, F. J. Sistemas de proteção atmosférica em linhas de transmissão. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, v. 35, n. 1, p. 112–130, 2022.

MOURA, L. R.; NASCIMENTO, A. S. Subestações digitais: tendências e desafios para o setor elétrico brasileiro. *Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Energia*, v. 4, n. 2, p. 55–68, 2022.

NASCIMENTO, D. S. et al. Desempenho e confiabilidade de transformadores de potência em subestações de transmissão. *Cadernos Técnicos da Eletrobras*, v. 10, n. 1, p. 45–59, 2021.

NASCIMENTO, M. de P. *O panorama do desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no estado do Rio Grande do Norte*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53448>. Acesso em: 11 jun. 2025.

NEOENERGIA COSERN. (2017). *História da Cosern (1961-2017)*. Neoenergia, Rio Grande do Norte. [Documento online]. Disponível em: [https://servicos.neoenergiacosern.com.br/a-cosern/Documents/A%20Hist%C3%B3ria/HISTORIA%20DA%20COSERN%20PARA%20O%20SITE%20\(3\).pdf](https://servicos.neoenergiacosern.com.br/a-cosern/Documents/A%20Hist%C3%B3ria/HISTORIA%20DA%20COSERN%20PARA%20O%20SITE%20(3).pdf). Acesso em: 11 jun. 2025.

NUNES, E. A. de F. *Análise de impactos na rede de distribuição de energia elétrica decorrentes da inserção de sistemas de geração fotovoltaicos*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24007>. Acesso em: 11 jun. 2025.

OLIVEIRA, A. C.; SILVA, J. F.; MORAES, D. A. Análise das subestações no contexto do SIN: desafios e perspectivas. *Cadernos de Energia*, v. 9, n. 1, p. 88–101, 2021.

OLIVEIRA, R. P. de. *Planejamento energético regional e o papel do Plano Decenal de Energia para o Rio Grande do Norte*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/58034>. Acesso em: 11 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Aspectos Técnicos da Expansão da Rede de Transmissão no Brasil*. Rio de Janeiro: ONS, 2024e. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Publicacao/aspectos-tecnicos-expansao-transmissao>. Acesso em: 06 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *História da operação do sistema interligado nacional*. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2003.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *O que é o SIN*. Rio de Janeiro: ONS, 2024a. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 05 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Plano da Operação Energética – PEN 2024*. Rio de Janeiro: ONS, 2024c. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relato%CC%81rio%20PEN%202024%20VE.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Procedimentos de Rede: Módulo 1 a 14*. Brasília: ONS, 2024e. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 11 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Relatório Anual ONS 2023*. Rio de Janeiro: ONS, 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2023-Relatorio-Anual-acessivel_21032024.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Relatório Anual ONS 2024*. Rio de Janeiro: ONS, 2024b. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relat%C3%B3rio%20Anual%20ONS%202024.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Relatório de Análise da Operação do Sistema Interligado Nacional – 2023*. Rio de Janeiro: ONS, 2024d. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Publicacao/relatorio-de-analise-da-operacao-do-sin>. Acesso em: 06 jun. 2025.

QGIS ASSOCIATION. Como o QGIS é financiado. [S.l.]: QGIS Association, 2024. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/getinvolved/governance/sustaining_members/sustaining_members.html. Acesso em: 30 jun. 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <http://qgis.org>. Acesso em: 30 jun. 2025.

QGIS.org Association. *QGIS Project Governance and Development*. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://qgis.org/en/site/about/governance.html>. Acesso em: 05 jun. 2025.

QGIS. *Visual changelog da versão 3.42*. Disponível em: <https://www.qgis.org/project/visual-changelogs/visualchangelog342/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

RODRIGUES, D. L.; ALMEIDA, S. R. *Corrente contínua na transmissão de energia elétrica: aplicações e perspectivas no Brasil*. Revista de Engenharia Elétrica, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 45-59, 2022.

SANTOS, D. F.; OLIVEIRA, C. R.; LIMA, P. H. Dimensionamento e escolha de estruturas metálicas para linhas de transmissão. *Caderno Técnico de Engenharia Elétrica*, v. 18, n. 2, p. 87–102, 2022.

SANTOS, M. R. et al. Aplicação da norma IEC 61850 em subestações brasileiras: avanços e desafios. *Revista de Engenharia Elétrica da UFMG*, v. 45, n. 3, p. 134–149, 2023.

SANTOS, R. F.; COSTA, J. A. *Crítérios técnicos para definição de traçado de linhas de transmissão: aspectos ambientais e sociais*. Revista Infraestrutura Energética, v. 11, n. 1, p. 24-38, 2023.

SILVA, M. de S. *Desafios da integração da geração eólica no Nordeste brasileiro: análise do Plano Decenal de Energia*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/56012>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SOUZA, A. G.; ALVES, T. R.; MELO, B. R. A modernização das subestações no Brasil: uma abordagem baseada em sensores e automação digital. *Revista Nacional de Tecnologia em Energia*, v. 6, n. 4, p. 78–92, 2022.

SOUZA, G. M.; PRADO, T. R. Aspectos sociais em projetos de transmissão: negociação e aceitação pública. *Revista de Políticas Energéticas*, v. 11, n. 1, p. 44–59, 2021.

SOUZA, H. T.; PRADO, F. L. Subestações coletoras no contexto das fontes renováveis no Brasil. *Cadernos de Energia Renovável*, v. 6, n. 1, p. 42–53, 2021.

SOUZA, L. M.; GONÇALVES, R. P. Subestações no Sistema Interligado Nacional: operação e controle. *Revista Técnico-Científica de Engenharia Elétrica*, v. 12, n. 4, p. 67–75, 2020.