

TRANSMISSÃO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Reflexões para a adaptação e ampliação da resiliência do Setor Elétrico Brasileiro

Compreender como as mudanças climáticas podem afetar o sistema de transmissão de energia é fundamental para subsidiar o planejamento com foco no aumento da resiliência do sistema elétrico brasileiro. Este Fact Sheet aborda o papel da transmissão de energia elétrica no Brasil, apresenta os riscos climáticos, como a EPE vem tratando esse tema e aponta caminhos para a adaptação do sistema elétrico frente às mudanças climáticas.

1 Entendendo o contexto

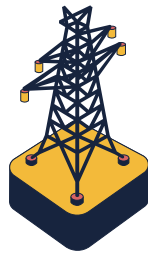
99,4%

da carga total brasileira em 2024 foi atendida pelo SIN

188 mil km

de linhas de transmissão da Rede Básica do SIN (tensões de 230 kV a 800 kV)

2 Identificando os Riscos Climáticos



O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema de produção e transmissão de energia composto por quatro subsistemas - Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte - onde a rede de transmissão desempenha as seguintes funções estratégicas:

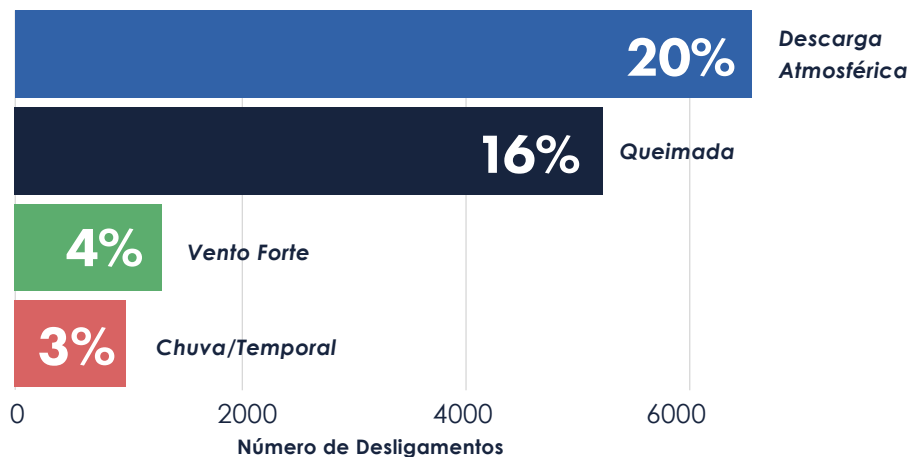
- ♦ **Interconectar** os subsistemas, possibilitando a gestão flexível dos recursos energéticos disponíveis, proporcionando a exploração da complementariedade das fontes de geração, a transferência de grandes volumes de energia para os centros de carga e a otimização da operação do sistema e dos seus custos;
- ♦ Garantir **estabilidade, continuidade, qualidade, segurança e flexibilidade** do sistema elétrico, mantendo-o em equilíbrio diante de perturbações, como falhas nos sistemas de geração e transmissão ou variações bruscas de carga;
- ♦ Fortalecer a **Transição Energética**, viabilizando a integração e expansão de fontes renováveis, essenciais para um sistema elétrico sustentável e resiliente.

3 Construindo caminhos

Distribuição de Causas de Desligamento em Linhas de Transmissão

Das **116 causas** de desligamentos em Linhas de Transmissão, **quatro fatores** estão ligados a eventos climáticos, e são responsáveis por **43%** do total de desligamentos entre 2014 e 2023, com destaque para descargas atmosféricas e queimadas.

*Outras 112 causas correspondem a 57%
Fonte: ONS, 2024. Elaboração: EPE, 2025



O presente documento aborda o sistema de transmissão de energia elétrica. A distribuição de energia em baixa tensão até as residências e pequenos consumidores não é tratada nesta publicação.

QUE VEM ACONTECENDO?

Eventos recentes, que vêm ocorrendo de forma mais intensa e frequente, indicam possíveis impactos das mudanças climáticas na transmissão de energia.

2013

Queimada ocorrida no Piauí causou curto-circuito em duas linhas de 500 kV (contingência dupla), **derrubando o sistema elétrico do Nordeste** e deixando os nove estados da **região sem energia por até 4 horas**, com corte de carga de 10.900 MW.

2016

Vendavais severos no estado de São Paulo causaram a **queda de oito torres de transmissão**, resultando no desligamento automático de linhas da Rede Básica do SIN.

2021

Diante do **cenário hidrológico crítico**, com redução da geração hidrelétrica no Sudeste, foi necessário ampliar a transferência de energia de outras regiões, como Norte e Nordeste, **aumentando o carregamento do sistema de transmissão em uma operação próxima dos limites de segurança**.

Queimadas provocaram 886 desligamentos automáticos na rede de transmissão no ano de 2021, o maior número registrado desde 2014.

2024

Chuvas intensas na região Sul deixaram em situação de risco diversas infraestruturas de geração e transmissão de energia elétrica. **Rajadas de vento e chuvas intensas causaram quedas de torres e alagamentos**. No ápice, mais de uma dezena de **subestações ficaram alagadas e 40 linhas de transmissão indisponíveis**.

2009

Tempestade severa gerou curto-circuito na linha de transmissão entre Itaberá (SP) e Ivaiporã (PR), desligando três linhas que transportam energia de Itaipu e **provocando um apagão em 18 estados, no DF e no Paraguai**, com impacto em 45% do consumo nacional.

2014

Descarga atmosférica em Tocantins causou curto-circuito em duas linhas de 500 kV (contingência dupla), resultando em um **blecaute que afetou 11 estados** e comprometeu o fornecimento de energia para aproximadamente 6 milhões de consumidores, com **corte de carga de 6.787 MW**.

2023

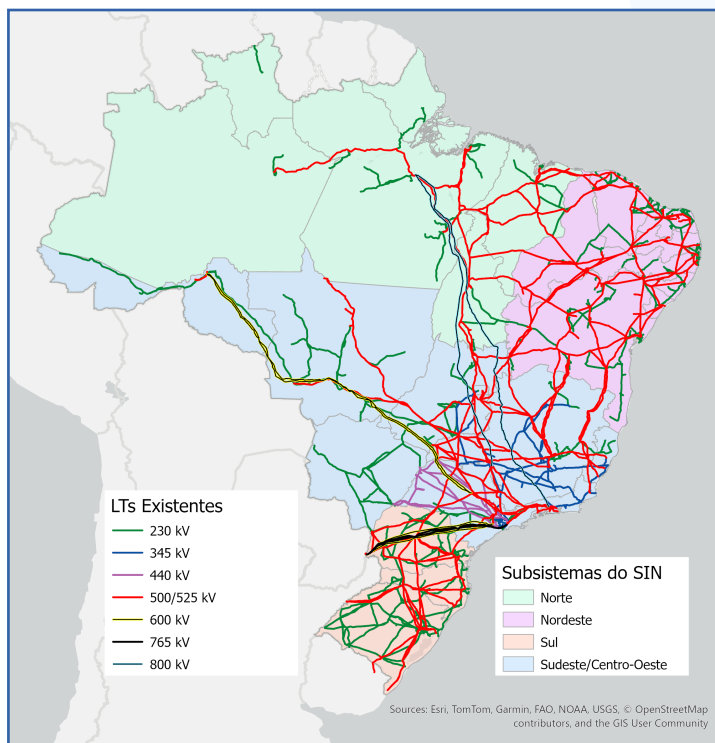
Seca histórica no rio Madeira, em Rondônia, provocou o desligamento da usina de Santo Antônio e **interrompeu o funcionamento de uma das maiores linhas de transmissão de energia elétrica do Brasil**, que conecta as regiões Norte e Sudeste, **trazendo desafios à manutenção da estabilidade do SIN**.

Onda de calor em novembro no Sudeste causou um **aumento expressivo nos carregamentos da rede de transmissão** devido ao aumento do consumo.

2025

Tempestade causou a **queda de cinco torres de transmissão** de energia ligadas à usina de Belo Monte, no Pará, trecho responsável por levar a energia para as regiões Sul e Sudeste.

ONDE ESTÃO AS LINHAS DE TRANSMISSÃO NO BRASIL?



O Brasil possui 188 mil km de linhas de transmissão, com destaque para as classes de tensão de 230 kV e de 500/525 kV, que somam cerca de 163 mil km de extensão. As linhas em corrente contínua, com tensão de 600 kV e 800 kV, são as mais extensas.

O **subsistema Sudeste/Centro-Oeste** é onde a maioria das linhas estão localizadas, com cerca de **45% da extensão total**. O restante está distribuído nos subsistemas Nordeste (22%), Sul (17%) e Norte (16%).

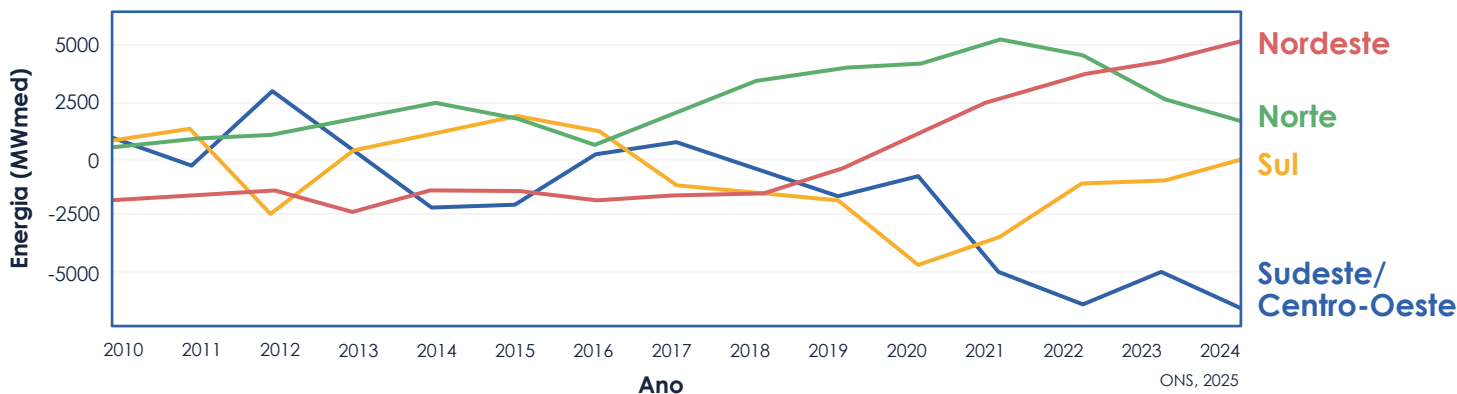
Entre 2010 e 2024, houve um **acréscimo de 88%** na extensão das linhas de transmissão do país, ampliando a capacidade de intercâmbio de energia elétrica entre os subsistemas, a redundância e a confiabilidade da rede e a interligação de novas regiões.

O aumento da infraestrutura de transmissão permite que regiões com maior geração atendam aquelas com maior demanda de energia, **otimizando o uso dos recursos energéticos do país com a respectiva redução de custos**.

Com a diversificação da matriz elétrica e a crescente participação de fontes renováveis, como eólica e solar, a **capacidade de transferir energia entre diferentes regiões** (intercâmbio de energia) se torna cada vez mais essencial para equilibrar oferta e demanda. O gráfico abaixo mostra como o Nordeste consolidou seu papel exportador nos últimos anos, impulsionado pelas renováveis; enquanto o Sudeste/Centro-Oeste aumentou as importações, sendo o principal centro de consumo.



Intercâmbio de Energia
Exportação Líquida por Subsistema



Uma **rede mais integrada e robusta** minimiza os riscos de interrupções de fornecimento, além de **melhorar a resiliência do sistema elétrico** diante de eventos climáticos extremos e picos de consumo.

IDENTIFICANDO RISCOS CLIMÁTICOS

RISCO

=

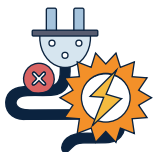
AMEAÇA

X

EXPOSIÇÃO

X

VULNERABILIDADE



Como as pessoas e atividades econômicas serão afetadas?

Consequências adversas para os sistemas humanos.



Como será o clima?

Evento ou tendência física.



Onde?

Presença de pessoas, infraestruturas e serviços.



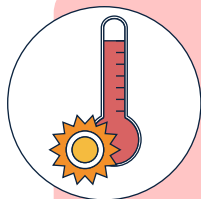
O que potencializa?

Propensão a ser afetado negativamente. Sensibilidade e falta de capacidade adaptativa.

Metodologia de avaliação de risco climático do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC.

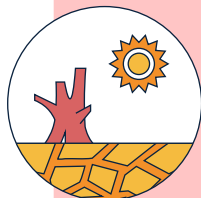
QUAIS SÃO AS PRINCIPAIS AMEAÇAS CLIMÁTICAS RELACIONADAS AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA E SEUS POSSÍVEIS IMPACTOS?

O sistema de transmissão de energia no Brasil é amplamente composto por linhas de transmissão aéreas e subestações, o que o torna particularmente exposto à influência de diferentes eventos climáticos. Esses fatores podem impactar diretamente a operação das redes de transmissão.



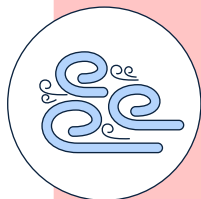
Aumento da temperatura

- ♦ Altas temperaturas reduzem a eficiência das linhas e transformadores
- ♦ Ondas de calor e altas temperaturas alteram os padrões de consumo e podem sobrecarregar a rede de transmissão



Aumento da frequência e duração das secas

- ♦ Aumenta a probabilidade de queimadas
- ♦ Favorece a deposição de partículas nos isoladores, aumentando o risco de curto-circuito



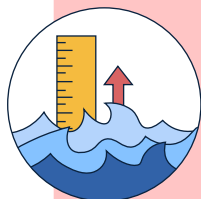
Aumento dos ventos fortes (rajadas)

- ♦ Podem danificar estruturas ou provocar queda de torres de linhas de transmissão



Aumento da magnitude e duração das chuvas extremas

- ♦ Podem causar alagamentos de subestações
- ♦ Deslizamento de encostas e enxurradas podem causar danos às estruturas

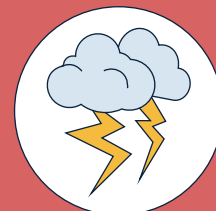


Aumento do nível dos oceanos

- ♦ Danos e corrosão às estruturas próximas à costa



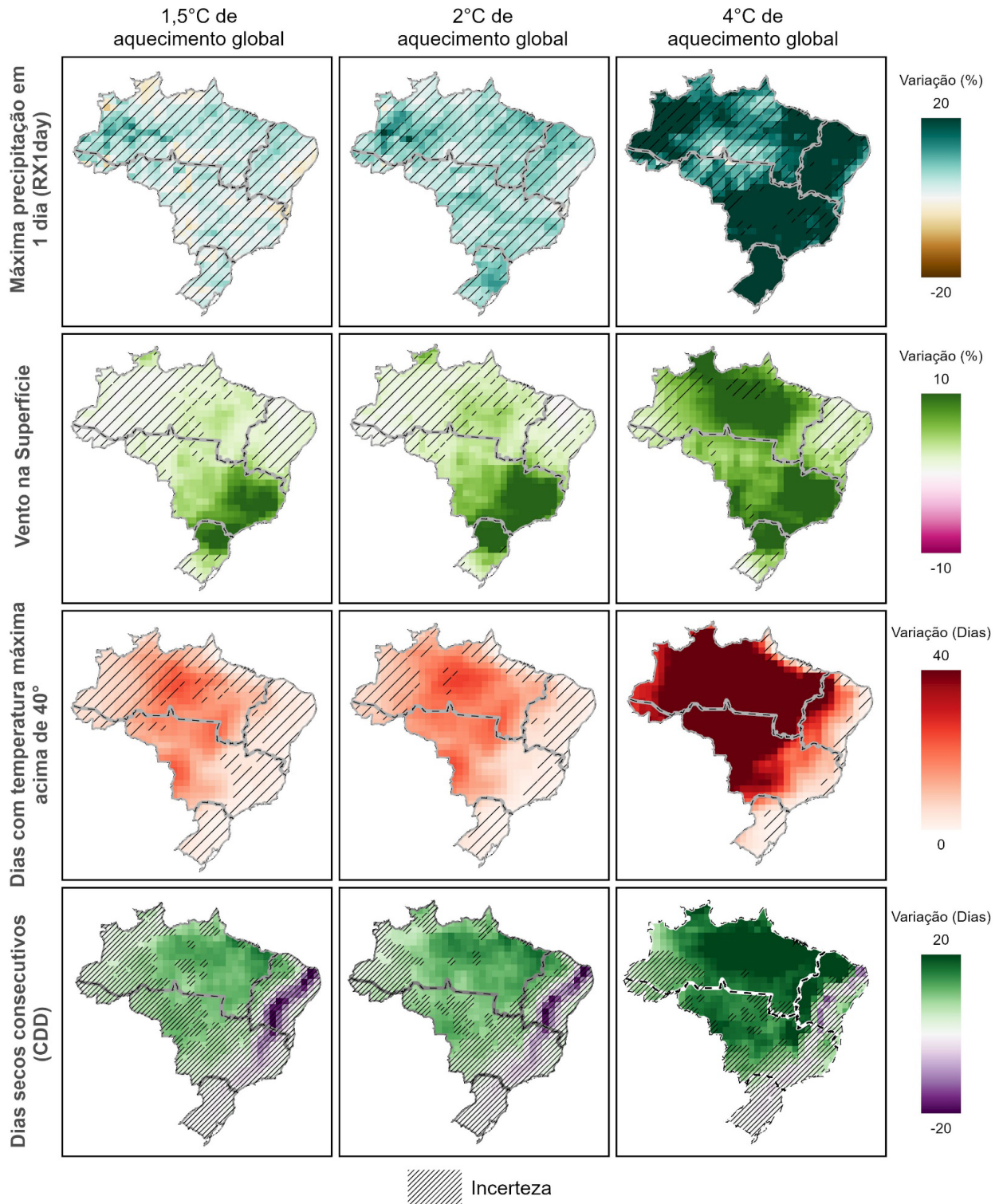
Altas temperaturas, clima seco e incidência de ventos favorecem o **clima de incêndio**, aumentando a probabilidade de queimadas que podem atingir o sistema de transmissão.



Tempestades podem ser acompanhadas de **descargas atmosféricas**, ampliando a possibilidade de atingirem equipamentos de transmissão e provocar desligamentos.

QUAIS SÃO AS TENDÊNCIAS PARA O CLIMA NO BRASIL?

Os resultados **das projeções realizadas pelo IPCC** apontam para as seguintes tendências para **variáveis climáticas** relevantes para o sistema de transmissão:



Variações projetadas para os níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C em relação a 1995-2014. Atlas Interativo (IPCC, 2021)

A vulnerabilidade do sistema de transmissão de energia às **mudanças climáticas** está diretamente ligada à exposição de suas **infraestruturas** a eventos extremos e a questões estruturais e sistêmicas.



QUAIS AS CARACTERÍSTICAS QUE PODEM DEIXAR O SISTEMA DE TRANSMISSÃO MAIS VULNERÁVEL AOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS?

Infraestruturas de grande extensão

As linhas de transmissão são infraestruturas lineares que apresentam grandes extensões e interligam a maior parte do território brasileiro. Por essa razão, estão mais expostas a intempéries.

Falta de redundância e ramificação da rede

Locais atendidos por redes sem alternativas para redirecionamento da energia ficam mais suscetíveis a interrupção de suprimento em caso de falhas.

Capacidade insuficiente de intercâmbio de energia entre subsistemas

A capacidade de transferência de energia entre subsistemas permite o envio de energia de áreas com excedente de geração para aquelas com déficit, auxiliando na mitigação dos impactos de eventos extremos que podem sobrecarregar o sistema elétrico, como secas intensas, tempestades e ondas de calor.

Linhas de transmissão dimensionadas para condições climáticas diferentes das que podem ocorrer em função das mudanças climáticas

Os projetos de infraestrutura podem não estar dimensionados para suportar as condições climáticas futuras. Por exemplo, cabos e materiais projetados para uma menor temperatura média do ar e torres projetadas para ventos de menor intensidade.

Infraestruturas em áreas suscetíveis a inundações

Subestações em áreas suscetíveis a inundações são mais vulneráveis às mudanças climáticas, pois chuvas intensas podem provocar alagamentos e a consequente interrupção no fornecimento de energia.

Infraestrutura envelhecida

Linhas de transmissão antigas estão mais suscetíveis a falhas, caso não tenham a manutenção necessária.

Dificuldade de Acesso e Manutenção

Ambientes de difícil acesso, como florestas densas ou regiões montanhosas, dificultam a realização de inspeções e reparos e possuem menor capacidade de recuperação em situações emergenciais.

Vulnerabilidade é a propensão ou predisposição a ser afetado negativamente. Abrange conceitos como sensibilidade ou suscetibilidade a danos e falta de capacidade de resposta e adaptação (IPCC, 2021).

CARACTERÍSTICAS E TENDÊNCIAS DOS SUBSISTEMAS



Subsistema com grande extensão territorial, alta sensibilidade socioambiental e carência de vias de acesso, o que traz desafios para implantação de novas linhas de transmissão. Composto por **sistemas com características radiais, com densidade de carga pontual e distante dos principais troncos de transmissão**. Tais características deixam o sistema mais vulnerável aos impactos das mudanças climáticas pela ausência de ramificação da rede e dificuldade de acesso.

Obs. O Sistema AC/RO, embora conectado ao Subsistema SE/CO, também se enquadra aqui.

Subsistema com a maior expansão de transmissão nos últimos anos. Atualmente é o **maior exportador de energia do sistema elétrico**, com predominância de geração de energia renovável variável, cujos recursos são diretamente influenciados pelas alterações do clima. Essas particularidades trazem desafios para a operação da rede.



Subsistema com **maior demanda por energia, troncos relevantes e alta densidade de linhas de transmissão**. A expansão da rede envolve dificuldades relacionadas a impactos socioambientais, custo e disponibilidade fundiária. A concentração populacional tende a amplificar impactos na rede elétrica, que já sofre desgaste natural, e traz desafios operacionais relevantes em situações de picos de demanda de energia elétrica. Por outro lado, se destaca como o

Subsistema com maior disponibilidade e monitoramento de dados e, principalmente, com maior flexibilidade operacional, sobretudo por contar com usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização. **Alta incidência de incêndios e descargas atmosféricas no subsistema.**

Subsistema com **alta dependência de importação de energia**, já que possui carga local maior do que sua geração. A expansão da rede envolve dificuldades relacionadas a impactos socioambientais, custo e disponibilidade fundiária. As ocorrências de **ondas de calor que resultam em picos de carga** podem ser particularmente desafiadoras. Em contrapartida, o subsistema conta com interligações internacionais, o que é uma alternativa para aumentar a segurança do suprimento. **As projeções relacionadas a chuvas extremas e ventos severos sobressaem para o subsistema Sul**. Nesse contexto, destaca-se principalmente a suscetibilidade das infraestruturas, como linhas com significativa exposição a ventos severos e subestações de energia em cotas sujeitas a alagamentos.



PRINCIPAIS RISCOS CLIMÁTICOS ASSOCIADOS À TRANSMISSÃO:

- ✦ Interrupção no fornecimento de energia e danos às infraestruturas
- ✦ Redução da capacidade de transmissão

CONSTRUINDO CAMINHOS

QUAIS OS DESAFIOS PARA A INCORPORAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO?

Critérios de Dimensionamento e Confiabilidade x Incertezas:

A definição de **novos critérios de projeto de infraestrutura e de planejamento com base em projeções climáticas** é fundamental para fortalecer a **resiliência do sistema de transmissão**. Porém, há um grau significativo de **incerteza nos modelos e projeções de variáveis climáticas** como ventos extremos e frequência e duração das secas, além de desafios na obtenção de séries históricas de dados de ventos e raios suficientemente extensas para análise de tendências.

Em geral, o critério de confiabilidade adotado no planejamento e operação do SIN é o N-1, o que significa que o sistema deve ser capaz de suportar a perda de qualquer elemento da rede sem interrupção, mantendo sua estabilidade, frequência e tensão, sem sobrecargas de equipamentos e instalações. Em algumas partes, principalmente nas interligações entre subsistemas e no atendimento a capitais estaduais, pode ser utilizado o critério N-2. A **adoção de critérios de confiabilidade mais conservadores** aumenta a redundância do sistema assim como os investimentos associados à transmissão.

Resiliência da Transmissão x Investimentos x Impactos Ambientais:

As mudanças climáticas impõem desafios significativos à infraestrutura de transmissão, exigindo **redes mais robustas para suportar condições climáticas extremas**, como ondas de calor mais intensas, tempestades mais frequentes e ventos extremos. No entanto, a adaptação envolve custos elevados com a **modernização de equipamentos, implementação de tecnologias avançadas** de monitoramento, expansão e **redundância do sistema**.

O desafio reside em **equilibrar a necessidade de maior resiliência com a viabilidade econômica e os impactos socioambientais associados à implantação de novas linhas e subestações**, exigindo estratégias de investimento inteligentes, uso de materiais mais resistentes e adoção de soluções inovadoras que garantam a confiabilidade da rede a longo prazo sem comprometer a sustentabilidade financeira do setor e tarifária para os usuários da rede.

Recomposição da Infraestrutura:

Os equipamentos do sistema de transmissão são de grande porte, o que implica **complexidade logística para a produção e transporte**, especialmente em regiões remotas. Além disso, exigem mão de obra especializada e suas peças têm baixa disponibilidade de estoque para pronta manutenção e reposição, o que representa um desafio em caso de quedas de torres ou falhas em equipamentos de transmissão.

Tendo em vista a necessidade de equilibrar resiliência, viabilidade econômica e impactos ambientais, não seria viável operar o sistema livre de riscos. Assim, são necessários métodos e procedimentos para assegurar rápida recuperação após impactos de eventos climáticos, minimizando os efeitos para os consumidores.

As **mudanças climáticas** afetam **tanto a oferta quanto a demanda de energia**, impactando diretamente o dimensionamento e a expansão da rede elétrica. Para garantir a confiabilidade e a resiliência da rede, é essencial compreender como esses fatores alteram o padrão de carga e **desenvolver soluções que permitam a adaptação da infraestrutura de transmissão**.

COMO O TEMA TEM SIDO ABORDADO PELA EPE?

Clique nas imagens para saber mais.



O **Plano Decenal de Energia – PDE** avalia as **perspectivas de expansão** do setor de energia para os próximos 10 anos. No PDE 2034, um dos enfoques foi o aumento da **resiliência do sistema elétrico** frente a **eventos climáticos extremos**.



O **Plano Nacional de Energia – PNE** busca orientar a **estratégia de longo prazo do setor energético no Brasil**. No PNE 2055, em elaboração, destaca-se a discussão de incertezas relacionadas à resiliência do sistema elétrico nos cenários futuros.



A **Nota Técnica "Metodologia para Avaliação e Recomendação de Dois Circuitos Simples em vez de um Circuito Duplo e Afastamento entre Circuitos"**, elaborada pela EPE e o ONS, estabeleceu critérios para aumentar a resiliência do sistema de transmissão em regiões estratégicas para o SIN com alta incidência de desligamentos por descargas atmosféricas e queimadas.



O **Plano de Recuperação dos Reservatórios de Regularização de Hidrelétricas do País (PRR)** propõe **31 ações**, no horizonte de **10 anos**, que contribuem **para a resiliência climática do sistema elétrico**. Dentre as ações propostas, vale ressaltar aquelas relacionadas a ampliações e reforços dos sistemas de transmissão e ao monitoramento de linhas importantes para o intercâmbio regional.



O **Estudo Sobre a Resiliência Climática do Sistema Acre/Rondônia** buscou avaliar o sistema de transmissão frente a **situações climáticas críticas**. As obras propostas possibilitam aproximadamente **dobrar a capacidade de importação e exportação de energia** desse subsistema. A EPE vem estudando também os sistemas dos estados do **Amazonas, Roraima e Amapá**, visando à ampliação da **resiliência de sistemas radiais localizados no Norte**.



Está em desenvolvimento o aprimoramento da **base de dados de indicadores e estatísticas socioambientais de riscos climáticos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas no setor de energia**, com o objetivo de oferecer uma ferramenta que possibilite identificar **tendências e monitorar informações** de interesse para o **planejamento energético nacional** sob a ótica de **mudanças climáticas**.



O **Plano Clima** é o instrumento da Política Nacional de Mudança do Clima que traz a estratégia da política climática brasileira. Neste contexto, a EPE participou da elaboração do **Plano Clima Adaptação do Setor de Energia** (em revisão após Consulta Pública), que já incorpora as iniciativas relacionadas à adaptação mencionadas aqui.

As mudanças climáticas exigem aprimoramento contínuo das metodologias e critérios utilizados para o planejamento da transmissão de energia elétrica. Nesse sentido, a EPE tem buscado incorporar os riscos climáticos nos relatórios de planejamento de novas linhas de transmissão e subestações (Relatórios R1).

Em 2024, em função das inundações ocorridas no Rio Grande do Sul, a EPE recomendou junto ao MME a retirada do Lote 2 do leilão 02/2024 para reavaliar a localização de empreendimentos em áreas vulneráveis, medida que reforça o compromisso de adaptar o planejamento da infraestrutura de transmissão a eventos externos. Além disso, as equipes técnicas da empresa participam de fóruns setoriais para absorver inovações tecnológicas que ampliem a eficiência e a resiliência do Sistema Interligado Nacional.

O QUE PODE SER FEITO?



Promover tecnologia e inovação

- ✦ Fomentar pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para a transmissão (por exemplo, sistemas de transmissão flexíveis - dispositivos FACTS, novos condutores para linhas de transmissão) e redes inteligentes.
- ✦ Ampliar tecnologias de armazenamento de energia, inclusive com abordagens locais.
- ✦ Realizar pesquisas e aprimoramento de tecnologias para monitoramento e previsão de eventos climáticos extremos.



Avançar na regulamentação

- ✦ Promover regulamentação que incentive medidas de adaptação e técnicas eficientes de resposta e mitigação.
- ✦ Revisar critérios de planejamento da expansão e da operação para equilibrar custos e benefícios para a população.
- ✦ Reavaliar critérios de confiabilidade do sistema frente aos novos cenários climáticos.
- ✦ Especificar limites, conceitos e padrões sobre eventos climáticos extremos.



Fortalecer Infraestruturas e capacidade de resposta

- ✦ Reforçar as infraestruturas e adotar equipamentos mais resistentes às condições climáticas futuras.
- ✦ Monitorar e sistematizar dados relativos a ameaças, vulnerabilidades e riscos.
- ✦ Mapear infraestruturas e equipamentos críticos e avaliar continuamente a adoção de medidas preventivas.
- ✦ Desenvolver planos de resposta a situações emergenciais.
- ✦ Desenvolver soluções compartilhadas entre agentes do setor para fortalecer a capacidade de resposta a emergências.



Aprimorar metodologias

- ✦ Revisar critérios de dimensionamento e identificação de locais para novas linhas e subestações.
- ✦ Considerar dados climáticos e de impactos no planejamento, como áreas suscetíveis a alagamentos e deslizamentos.



Ampliar comunicação

- ✦ Criação de comitês para monitoramento de riscos climáticos e resposta a eventos extremos.
- ✦ Articular com atores envolvidos nas áreas de energia, recursos hídricos, meio ambiente, bem como outros segmentos de infraestrutura.

COORDENAÇÃO GERAL

Thiago Guilherme Ferreira Prado
Thiago Ivanoski Teixeira

COORDENAÇÃO EXECUTIVA

Elisângela Medeiros de Almeida

EQUIPE TÉCNICA

Ana Dantas Mendez de Mattos
Alfredo Lima Silva
Bernardo R. G. de Oliveira
Clarice Buarque de Macedo Lira
Clarice Augusta C. Cardoso

EQUIPE TÉCNICA (CONT.)

Gustavo Fernando Schmidt
João Mauricio Lapa (estagiário)
Luciana Athanasio de Azevedo
Maria Clara Tenório (estagiária)
Paula Cunha Coutinho (coord.)

PARTICIPAÇÃO

Andre Cassino Ferreira
André Viola Barreto
Diego Pinheiro de Almeida
Daniel José Tavares de Souza
Dourival de Souza Carvalho Junior
Maria de Fatima de Carvalho Gama

PARTICIPAÇÃO (CONT.)

Gabriel Konzen
Kátia Gisele S. Matosinho
Leonardo de Sousa Lopes
Lucas Simões de Oliveira
Luciana Alvares da Silva
Marcelo Luiz de C. Moura Moreira
Marcos Vinicius G. da S. Farinha
Mariana R. de Carvalhaes Pinheiro
Rachel Martins Henriques
Rafael Theodoro Alves e Mello
Roney Nakano Vitorino
Thais Pacheco Teixeira
Thiago Galvão

ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL

Maura Cruz Xerfan (coordenação)
Aretha de Souza Vidal Campos (atendimento)
André Duarte e Adriano Veloso (projeto gráfico)

A EPE se exime de quaisquer responsabilidades sobre decisões ou deliberações tomadas com base no uso das informações contidas neste informe, assim como pelo uso indevido dessas informações.