

***Roadmap* para Fortalecimento da Resiliência do Setor Elétrico Brasileiro em resposta às Mudanças Climáticas**

Outubro 2026



FICHA TÉCNICA



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário Executivo

Gustavo Cerqueira Ataíde

Secretário Nacional de Energia Elétrica

João Daniel de Andrade Cascalho

Secretária Nacional de Geologia, Mineração e Transformação Mineral
vago

Secretário Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Renato Cabral Dias Dutra

Secretária Nacional de Transição Energética e Planejamento

Mariana de Assis Espécie

www.mme.gov.br

Rio de Janeiro, 2026



Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Thiago Guilherme Ferreira Prado (interino)

Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

www.epe.gov.br

EQUIPE TÉCNICA

Coordenação Geral

Thiago Ivanoski Teixeira

Coordenação Executiva

Elisangela Medeiros de Almeida

Coordenação Técnica

Paula Cunha Coutinho de Andrade

EPE

Ana Dantas Mendez de Mattos
Alfredo Lima Silva
Clarice Augusta Carvalho Cardoso
Clarice Buarque de Macedo Lira
Gustavo Fernando Schmidt
Luciana Athanasio de Azevedo
Mathias Luiz Mafort Ouverney
Paula Cunha Coutinho de Andrade

Gabriel Marques Gonçalves Pereira (estagiário)
Gabriel de Souza Crespo da Silva (estagiário - parcial)
João Mauricio Julião de Souza Lapa (estagiário - parcial)
Maria Clara Tenório (estagiária - parcial)

VALOR PÚBLICO

As questões relacionadas às mudanças climáticas vêm trazendo transformações na produção e no uso da energia, nos hábitos de consumo, na economia, na legislação e, conseqüentemente, na forma de planejar o sistema energético. Compreender essas relações é fundamental para **orientar políticas públicas e subsidiar o planejamento da expansão** com foco no **aumento da resiliência do sistema elétrico brasileiro**.

Reconhecendo que a resiliência climática é um desafio socioambiental estratégico para a manutenção e expansão do sistema, a EPE tem intensificado seus esforços para aprimorar a **incorporação de riscos climáticos no planejamento energético**, por meio do desenvolvimento de metodologias, estudos e ferramentas analíticas. Nesse sentido, projeções climáticas e seus potenciais impactos estão sendo discutidos e avaliados no planejamento de médio e longo prazo do setor, auxiliando no desenvolvimento de um sistema capaz de manter suas funções em cenários futuros.

Para além do planejamento energético, a **produção e o compartilhamento de informações** fortalecem a capacidade de atuação dos diversos atores do setor e demais partes interessadas, contribuindo para decisões mais informadas e coordenadas e ampliando a resiliência climática do sistema.

Com isso, busca-se **formar uma base de conhecimento, capaz de orientar políticas públicas, apoiar o planejamento da expansão e fortalecer estratégias de adaptação do sistema**, gerando benefícios diretos para a sociedade por meio da segurança energética, da redução de vulnerabilidades e da maior capacidade de resposta frente às mudanças climáticas.

Por fim, cabe destacar que o *Roadmap* está associado a quatro objetivos estratégicos da EPE: PF01 - Aprimorar a indicação de oportunidades de investimento no setor de energia, de forma integrada e isenta, visando a segurança energética nacional e o desenvolvimento sustentável; PF03 - Contribuir para a inovação, a transição energética e o desenvolvimento de novos modelos de negócios no setor energético; PF04 - Aprimorar o assessoramento ao Ministério de Minas e Energia e às entidades responsáveis pela formulação da Política Energética Nacional; e S02 - Fortalecer o diálogo com os múltiplos agentes do setor energético e demais partes interessadas, buscando consensos na promoção da transição energética nacional.

APRESENTAÇÃO

A elaboração deste *Roadmap*, abordando iniciativas e estratégias que permitam o fortalecimento da resiliência do setor elétrico em resposta às mudanças climáticas, está entre os resultados dos debates e análises técnicas que compõe o [Plano de Recuperação dos Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas do País](#) (PRR), em atendimento ao art. 30 da Lei nº 14.182/2021.

Após o período de escassez hídrica de 2020-2021, episódio marcante da história recente do setor elétrico, consolidou-se o entendimento de que as mudanças climáticas representam um vetor de pressão relevante sobre a segurança elétrica nacional.

Assim, o tema da resiliência climática, ainda que já abordado de maneira transversal em diferentes estudos conduzidos pela EPE, especialmente nos Planos Nacionais de Energia (PNE) e Planos Decenais de Expansão de Energia (PDE), ganhou centralidade e se materializou como a ação de curto prazo, a CP17 do PRR, dedicada à elaboração deste *Roadmap*.

A pergunta que guia este estudo é, ao mesmo tempo, simples e desafiadora: como fortalecer a resiliência do sistema elétrico brasileiro (SEB) diante das mudanças climáticas globais?

Responder a essa questão exige reconhecer que resiliência não é um estado final, mas um processo contínuo de adaptação, que não se esgota com o *Roadmap* e que exige esforço e atualização permanente do setor.

Se, no princípio, o debate estava centrado em compreender até que ponto as mudanças climáticas contribuíam para a depleção dos reservatórios, rapidamente se tornou evidente que a questão é mais ampla: envolve não apenas a gestão da água e a operação das hidrelétricas, mas também a diversidade e a integração da matriz elétrica, a articulação entre setores, e a capacidade institucional e regulatória de lidar com riscos e incertezas.

Como um guia estratégico, este *Roadmap* aponta as ações necessárias para que o sistema elétrico brasileiro continue seguro e confiável diante das incertezas climáticas, sustentando o desenvolvimento do país.

O trabalho aqui apresentado representa mais um passo nesse processo. Após a publicação da [Nota Técnica de Revisão Bibliográfica](#) (NT-016/2023-EPE-DEA-SMA) e dos seis [factsheets temáticos](#) (Hidreletricidade e Mudanças Climáticas; Geração Solar e Mudanças Climáticas; Geração Eólica e Mudanças Climáticas; Geração Térmica e Mudanças Climáticas; Transmissão e Mudanças Climáticas; e Demanda de Energia Elétrica e Mudanças Climáticas), concluímos o projeto com a consolidação do *Roadmap*, cujo propósito é transformar o conhecimento acumulado em estratégias e medidas que orientem o fortalecimento da resiliência climática do SEB.

Dessa forma, busca-se garantir que o planejamento da expansão energética seja cada vez mais robusto, adaptativo e capaz de lidar com a incerteza crescente dos impactos climáticos.



Contextualização e Abordagem do Estudo

Por que a resiliência climática é importante?

No Brasil, a elevada participação de fontes renováveis torna o sistema elétrico particularmente sensível à variabilidade climática.

Nossa matriz é, historicamente, altamente renovável, dependendo de forma direta de recursos naturais e condições meteorológicas. Além disso, a geração e a carga são conectadas por uma extensa rede de transmissão, majoritariamente aérea, diretamente exposta ao clima.

Dessa forma, alterações graduais nas condições climáticas, combinadas ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos como secas prolongadas, chuvas intensas, ventos severos e ondas de calor, podem impactar diretamente o funcionamento do sistema.

As mudanças climáticas vêm se consolidando como um vetor relevante de transformação do setor elétrico brasileiro.

Ao longo de sua trajetória, o setor elétrico brasileiro foi moldado por eventos climáticos e pelas respostas adotadas. Esse histórico reflete não apenas sua capacidade de adaptação, mas também a importância de compreender continuamente as interações entre clima e energia para orientar a leitura dos desafios atuais e futuros.

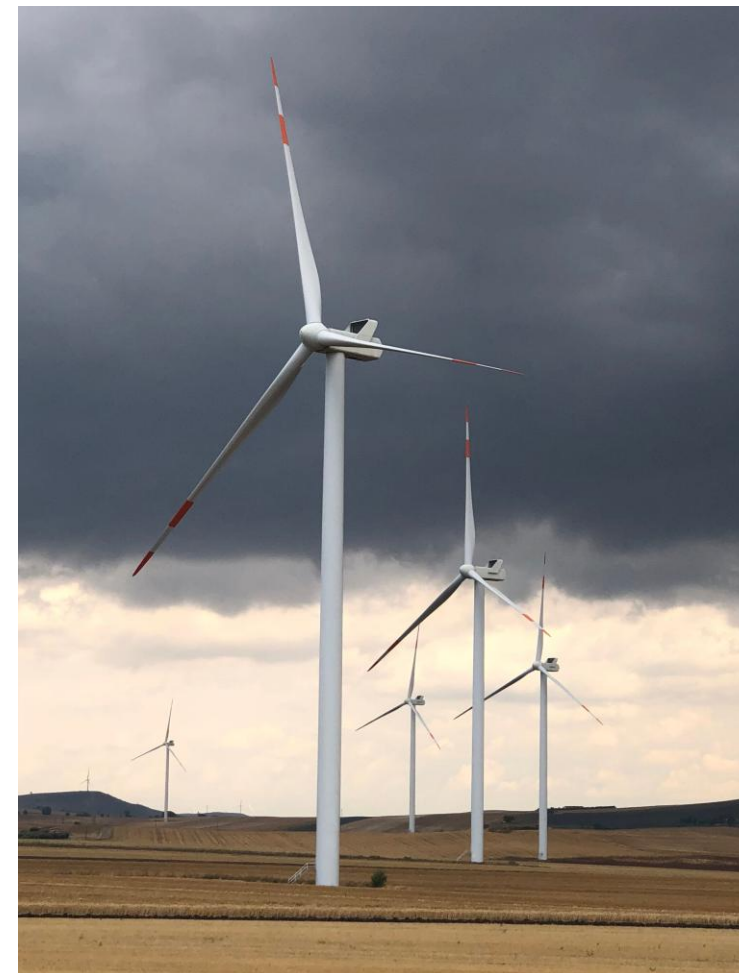
Essa dinâmica coincide com um momento de transformação acelerada na própria matriz, marcada pela expansão das fontes eólica e solar, o crescimento da geração distribuída, a introdução de novas tecnologias de armazenamento e a evolução dos modelos de mercado.

Embora tragam oportunidades importantes para a transição energética, essas mudanças adicionam novas camadas de complexidade à operação e ao planejamento do sistema.

A transição energética exige o fortalecimento da resiliência do sistema.

Mais do que garantir robustez ou confiabilidade, ser resiliente significa capacitar o sistema para antecipar, absorver, adaptar-se e recuperar-se de eventos adversos, mantendo suas funções essenciais mesmo diante de incertezas crescentes.

A Resiliência Climática tornou-se central para a segurança energética.



Aonde queremos chegar com o *Roadmap*...



Objetivo

Abordar iniciativas e estratégias que permitam o fortalecimento da resiliência do setor elétrico em resposta às mudanças climáticas, conforme descreve a ação de curto prazo - CP17 do Plano de Recuperação dos Reservatórios de Regularização de Usinas Hidrelétricas do País (PRR).

Objetivos específicos

- Sistematizar o conhecimento existente, consolidando os principais estudos e evidências sobre a influência do clima sobre o sistema elétrico;
- Caracterizar a evolução do sistema elétrico e aprendizados frente a eventos climáticos;
- Identificar ameaças e riscos climáticos sistêmicos, considerando os efeitos das mudanças climáticas sobre a geração, transmissão e demanda de energia elétrica;
- Identificar os desafios para fortalecimento da resiliência climática; e
- Apontar estratégias e medidas para o fortalecimento da resiliência do setor elétrico brasileiro.

... e como estamos construindo esse caminho?

O processo de desenvolvimento do *Roadmap* foi estruturado em três etapas:

Etapa 1: Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento do trabalho partiu de uma revisão da literatura sobre resiliência climática aplicada aos sistemas de energia. O objetivo foi mapear os principais conceitos, instituições que trabalham com tema, estudos, bases de dados e ferramentas disponíveis, além de avaliar o panorama das mudanças climáticas e seus potenciais impactos no sistema elétrico brasileiro. Essa etapa estabeleceu a base conceitual do estudo e resultou na publicação da **Nota Técnica “Fortalecimento da Resiliência do Setor Elétrico em Resposta às Mudanças Climáticas – Revisão Bibliográfica”** (NT-016/2023-EPE-DEA-SMA) e do seu **Caderno Síntese**.

Etapa 2: Fact Sheets Temáticos

Na segunda etapa, foram elaborados *fact sheets* para seis segmentos do sistema elétrico brasileiro: **geração hidrelétrica, solar, eólica e térmica, bem como transmissão e demanda de energia elétrica**. Esses documentos apresentam um panorama de como as mudanças climáticas podem afetar cada um desses segmentos, por meio da avaliação das ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidades, além da identificação de desafios, de iniciativas em andamento e de caminhos para a adaptação do sistema às mudanças climáticas.

Etapa 3: Consolidação do Roadmap - Visão Sistêmica

Agora, na etapa final, os aprendizados anteriores são integrados em uma abordagem sistêmica, considerando as relações entre os segmentos. O *Roadmap* mapeia os riscos, identifica desafios, lacunas de conhecimento e aponta estratégias e medidas para fortalecer a resiliência sob diferentes cenários climáticos.





Base Conceitual

Os conceitos que orientam o *Roadmap*.

Esta seção apresenta a **base conceitual que orienta o desenvolvimento do *Roadmap***.

O trabalho se apoia em **referenciais consolidados** na literatura, com destaque para instituições como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a Agência Internacional de Energia (IEA) e o *Electric Power Research Institute* (EPRI), entre outras, que orientam a análise dos impactos das mudanças climáticas sobre sistemas energéticos.

Inicialmente, são apresentados os conceitos de resiliência e de riscos climáticos, os quais estão sujeitos a incertezas. A compreensão do **risco constitui o eixo estruturante do estudo e orienta a proposição de estratégias voltadas ao fortalecimento da resiliência climática do sistema elétrico brasileiro**.

O que é resiliência climática?

A resposta global às mudanças climáticas estrutura-se em dois eixos principais: mitigação e adaptação. Enquanto a mitigação refere-se à redução das emissões de gases de efeito estufa, a adaptação envolve o processo de ajuste às condições climáticas e aos seus efeitos.

No contexto da adaptação, a resiliência climática é definida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2023) como “a **capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos interconectados de lidar com um evento perigoso, tendência ou distúrbio, respondendo ou se reorganizando de forma a manter sua função, identidade e estrutura essenciais**. A resiliência é um atributo positivo quando mantém a capacidade de adaptação, aprendizado e/ou transformação.”

Em sistemas de energia, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022) define a resiliência climática como:

“ **Capacidade de antecipar, absorver e lidar com eventos potencialmente adversos relacionados às mudanças climáticas, bem como se recuperar de seus impactos.** ”

A **resiliência climática**, portanto, relaciona-se diretamente à **capacidade do sistema de responder aos riscos climáticos**, constituindo um **processo contínuo de adaptação e ajuste às novas condições**.



Sistema Climático, Impactos e Resposta

Fonte: Elaboração própria, a partir de IPCC, 2023

Compreender os riscos climáticos é essencial para fortalecer a resiliência do sistema elétrico, fornecendo a base para a formulação de estratégias.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) define risco climático como **o potencial de consequências adversas para sistemas humanos ou ecológicos**, reconhecendo a diversidade de valores e objetivos associados a esses sistemas.

No contexto da mudança do clima, **os riscos podem surgir dos possíveis impactos da mudança do clima, bem como das respostas humanas a mudança do clima.**

A partir dessa definição, os riscos climáticos podem ser classificados em duas categorias principais (TCFD, 2017). Os **riscos físicos** estão associados aos impactos diretos das alterações climáticas, podendo decorrer de eventos extremos (agudos) ou de mudanças de longo prazo (crônicas). Já os **riscos de transição** estão relacionados a transformações em políticas, legislações, tecnologias e mercados, decorrentes da resposta às mudanças do clima.

Conceitualmente, os riscos físicos **resultam de interações dinâmicas** entre **ameaças** relacionadas à mudança do clima com a **exposição** e a **vulnerabilidade**. Esses componentes estão sujeitos a **incertezas em termos de magnitude e probabilidade de ocorrência** e podem mudar ao longo do tempo e espaço devido a mudanças socioeconômicas e às tomadas de decisões humanas. (IPCC, 2023).



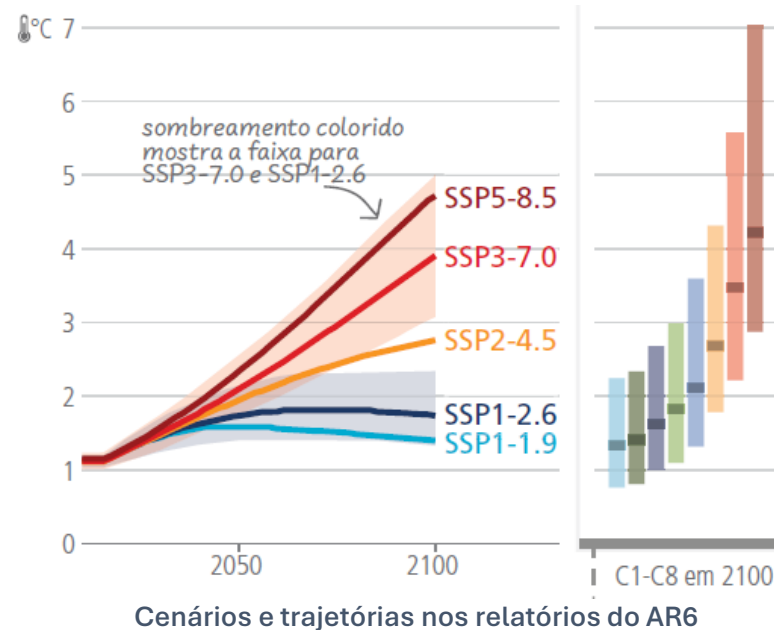
Este **Roadmap** se concentra na identificação e avaliação dos **riscos físicos**, analisados a partir das **ameaças, exposição e vulnerabilidade**.

A análise dos riscos climáticos requer a consideração de possíveis condições futuras do clima.

Cenários climáticos são utilizados para explorar as emissões futuras, mudanças climáticas globais, impactos e riscos relacionados e possíveis estratégias de mitigação e adaptação (IPCC, 2023).

Eles representam diferentes trajetórias de evolução das emissões de GEE e suas implicações para o clima global, permitindo avaliar as **possíveis mudanças em variáveis climáticas**, como temperatura e precipitação, e suas consequências sobre o sistema energético global, inclusive o setor elétrico brasileiro.

Os cenários climáticos (ilustrados na figura ao lado) não representam previsões determinísticas, mas **futuros plausíveis sujeitos a incertezas inerentes** tanto ao sistema climático quanto às [trajetórias socioeconômicas e de emissões de gases de efeito estufa](#).



Fonte: IPCC, 2023

Este estudo se baseia nas projeções geradas pelos **modelos climáticos globais** do **CMIP6** (Coupled Model Intercomparison Project), que utilizam cenários como dados de entrada, como os apresentados na tabela abaixo.

O CMIP6 subsidiou o **Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (AR6)**, e o presente estudo utiliza os **dados disponibilizados em seu Atlas Interativo** (IPCC, 2021).

Cenários de emissões de GEE		Descrição da categoria
SSP 1 - 2.6	Baixa	Limitar o aquecimento global a 2°C
SSP 2 - 4.5	Intermediária	Limitar o aquecimento global a 3°C
SSP 3 - 7.0	Alta	Limitar o aquecimento global a 4°C
SSP 5 - 8.5	Muito Alta	Exceder o aquecimento de 4°C

Ao **incorporar cenários**, o estudo reconhece a **natureza incerta e dinâmica do sistema climático**, permitindo avaliar os riscos sob diferentes condições plausíveis e **orientar decisões robustas no curto, médio e longo prazos**.

A incerteza deve ser reconhecida e incorporada no planejamento da resiliência.

A avaliação de riscos climáticos e a definição de estratégias para a resiliência climática ocorrem em um contexto de elevada incerteza.



Incerteza Climática

Refere-se à **magnitude, intensidade e evolução temporal** das mudanças climáticas, incluindo **trajetórias futuras de emissões**.



Incerteza Socioeconômica

Relacionada à evolução de fatores como **crescimento populacional, renda, padrões de consumo** e transformações estruturais na economia, que influenciam a demanda por energia ao longo do tempo.



Incerteza do Conhecimento

Decorre de **limitações de dados**, incertezas em **modelos** climáticos e energéticos, **lacunas de informação** e dificuldades na representação de sistemas complexos e na quantificação de impactos.



Incerteza do Sistema Elétrico

Envolve a **evolução do arcabouço regulatório**, o desenvolvimento e adoção de **tecnologias**, a **dinâmica de mercado** e as possíveis configurações futuras do sistema elétrico.

No contexto das mudanças climáticas, a busca por **soluções eficazes** deve promover, simultaneamente, a **adoção de políticas e medidas robustas**, garantindo a segurança energética diante de diversos cenários futuros, e **flexíveis**, de modo que **possam ser continuamente adaptadas** à medida que novos dados se tornem disponíveis e os cenários climáticos evoluam.

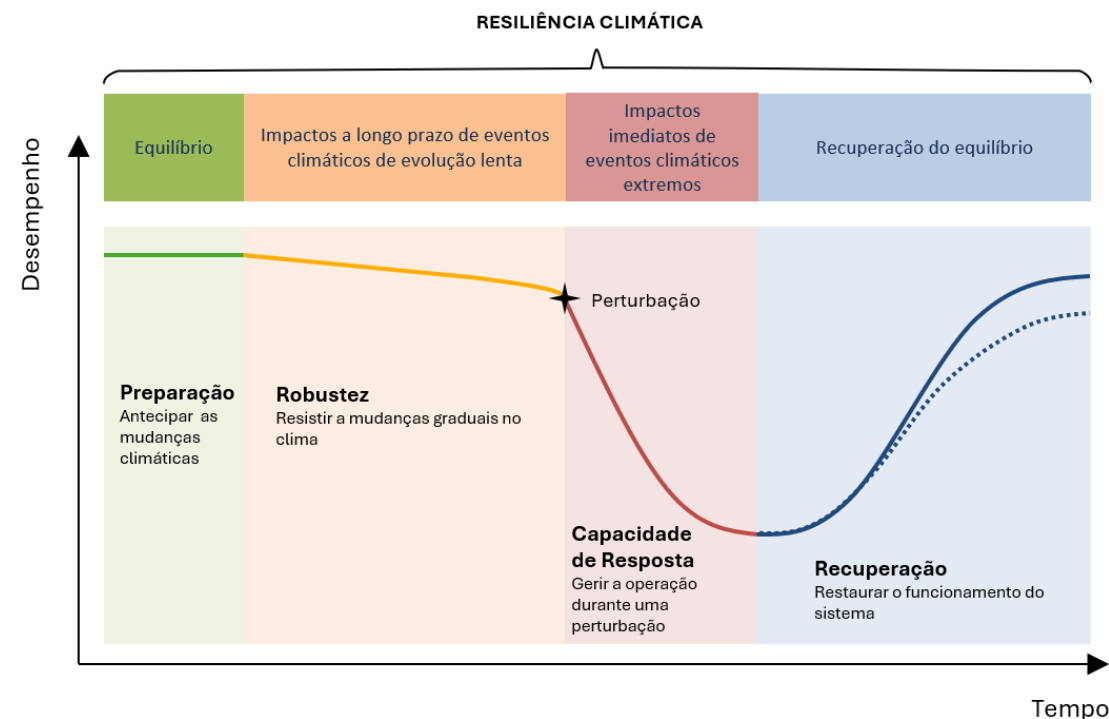
A avaliação de riscos orienta a definição das estratégias, frente às incertezas.

A proposição de **estratégias para fortalecimento da resiliência climática no setor elétrico** fundamenta-se na compreensão dos **riscos climáticos** e na **necessidade de atuar sobre os fatores que os determinam**.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), as medidas para melhoria da resiliência climática podem ser compreendidas a partir de quatro dimensões, que refletem diferentes **formas de atuação ao longo da cadeia de impacto climático**:

- **Preparação:** avaliar, antecipar e se preparar para as mudanças no clima;
- **Robustez:** resistir a mudanças graduais;
- **Capacidade de Resposta:** gerir a operação durante eventos extremos; e
- **Recuperação:** restaurar o funcionamento do sistema após interrupções decorrentes de impactos climáticos.

Complementarmente, o *Electric Power Research Institute* (EPRI, 2023) propõe quatro categorias de ações de adaptação para o sistema elétrico: **reforço de ativos existentes** (*hardening*), **instalação de novos ativos**, **mudança nas configurações do sistema** e **implementação de novos procedimentos operacionais**. Além disso, **medidas pelo lado do consumidor** também desempenham papel importante para a resiliência do sistema.



Estrutura conceitual da resiliência climática

Fonte: Adaptado de IEA, 2022

No presente estudo, a definição de **estratégias e medidas** é orientada pelos **riscos climáticos** identificados e por sua **relevância relativa para o sistema elétrico**.



A evolução do Sistema Elétrico Brasileiro frente a eventos climáticos

Um sistema em constante evolução.

A configuração atual do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) resulta de um processo contínuo de aprendizado, moldado por diversos fatores. Dentre eles, estão os eventos climáticos e as respostas institucionais, operacionais e estruturais adotadas ao longo do tempo.

A matriz elétrica brasileira sempre se destacou pela **elevada participação de fontes renováveis (87% em 2025)**, especialmente em função da grande capacidade de geração hidrelétrica. Essa característica exigiu a **construção de um arranjo capaz de lidar com as incertezas climáticas**, em especial, hidrológicas.

Ao longo de sua trajetória, crises atuaram como catalisadores de mudança, impulsionando transformações que fortaleceram a capacidade adaptativa do sistema.

Esta seção discute essa evolução e sua relação com eventos climáticos, destacando como esse processo contribuiu para o **desenvolvimento da capacidade adaptativa do sistema**, fundamental para o enfrentamento dos riscos associados às mudanças climáticas. Ainda que não esgote todas as lições aprendidas em situações adversas, essa síntese evidencia a importância da coordenação institucional, do planejamento e do reforço da infraestrutura para enfrentamento das mudanças do clima.

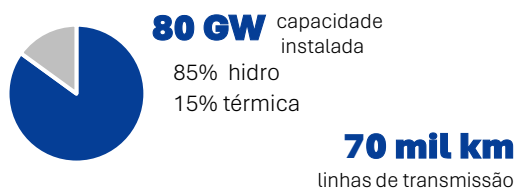
Da crise energética de 2001 aos dias atuais...

2001

A **crise energética de 2001** evidenciou vulnerabilidades do sistema, associadas à alta dependência hidrológica e a fragilidades no planejamento e nos investimentos em expansão.

A resposta envolveu **medidas emergenciais, como o racionamento, e reformas estruturais, com o Novo Modelo Setorial**, incluindo o **fortalecimento do planejamento** (criação da EPE), **criação do PROINFA e leilões de energia**.

Ao longo dos anos 2000, a significativa **expansão e diversificação da oferta de energia e da infraestrutura de transmissão** aumentaram a resiliência climática e a segurança energética.

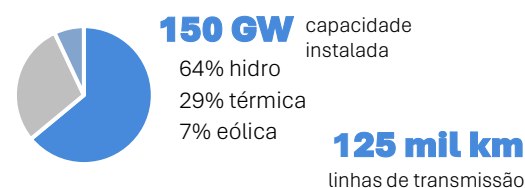


(EPE, 2026)

2016

A partir de 2012 o setor voltou a sofrer com um **período de seca prolongada** que se estendeu pelos anos seguintes até 2016, com diversos reservatórios em níveis críticos. Dessa vez o SIN contava com um parque térmico com maior capacidade e **enfrentou a crise por meio do despacho térmico**, gerando novos desafios relacionados ao aumento do custo de geração.

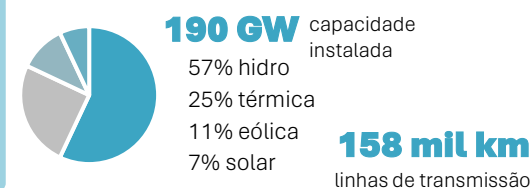
Nos anos seguintes a **expansão da oferta de energia centralizada** teve forte presença de **empreendimentos eólicos e fotovoltaicos**, fontes renováveis variáveis, além do **crescimento acelerado da geração distribuída** e da **ampliação da capacidade de intercâmbio entre as regiões**.



2021

Em 2021, o setor elétrico enfrentou novo **desafio para manter o equilíbrio entre oferta e demanda** de energia em decorrência da **pior escassez hídrica em 91 anos** e da nova dinâmica de uma matriz altamente dependente de fontes variáveis.

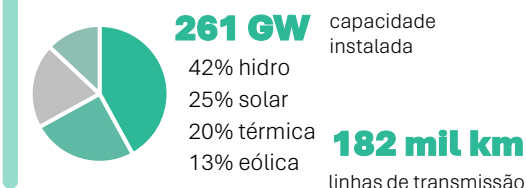
A **gestão da crise de 2021** caracterizou-se por **coordenação institucional, ampliação do despacho térmico, flexibilização de limites de intercâmbio entre subsistemas, importação de energia, ajustes operativos**, além de **mecanismos de resposta da demanda e criação de sinal tarifário e encargo específico** para custear o enfrentamento da escassez hídrica.



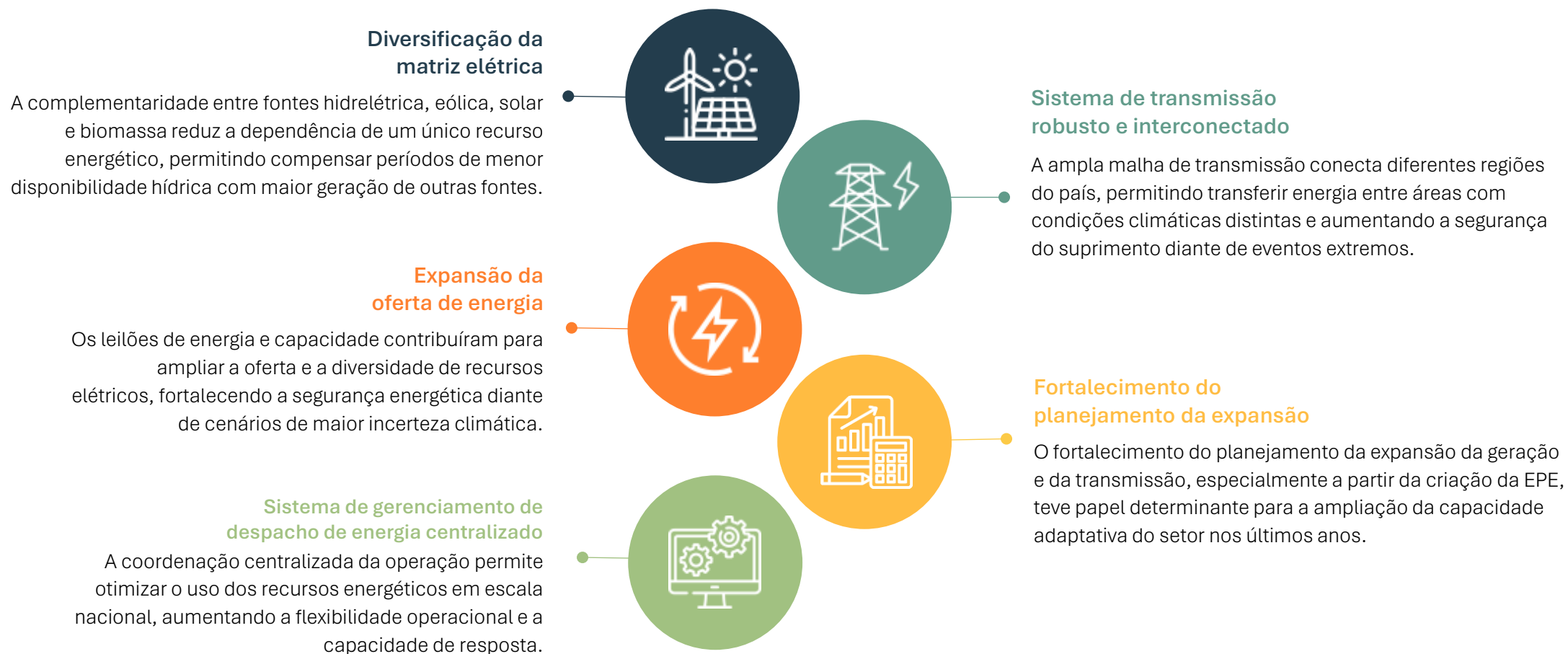
2025

A **expansão das fontes eólica e solar** e da geração distribuída alterou a dinâmica do sistema, aumentando a **necessidade de flexibilidade, coordenação e capacidade de resposta** a variações na geração e carga, enquanto a capacidade de armazenamento dos reservatórios se manteve estagnada, trazendo desafios para o setor.

Desde 2021, novas ações fortaleceram a resiliência do sistema, como: elaboração e implementação do **PRR, contratação de reserva de capacidade e reformulação do mercado** (Lei nº 1569/2025), além da **expansão do sistema de transmissão**, com a elaboração de estudos específicos para reforço de sistemas radiais.



...o sistema elétrico brasileiro vem desenvolvendo sua capacidade adaptativa.





Fonte: Ricardo Stuckert / PR (Wikimedia Commons)

Tendências climáticas e Impactos

A compreensão das tendências climáticas e dos potenciais impactos sobre o sistema elétrico nacional subsidia a avaliação dos riscos climáticos.

Nesta seção, são analisadas as principais **tendências climáticas projetadas para o Brasil**, com base na literatura recente, bem como seus **possíveis desdobramentos sobre o sistema elétrico nacional**. A partir desse panorama, é apresentada uma avaliação qualitativa dos **possíveis impactos das mudanças climáticas sobre seis segmentos do setor elétrico**, contemplando a análise de sua sensibilidade às variáveis climáticas e da vulnerabilidade do sistema.

O conjunto de análises desenvolvido nesta seção fornece, portanto, uma base qualitativa para a identificação e compreensão dos principais riscos climáticos do setor elétrico brasileiro. Esse conhecimento subsidia, na sequência, a classificação e priorização dos riscos climáticos relevantes, permitindo uma avaliação mais estruturada dos seus potenciais efeitos e da capacidade de resposta do sistema.

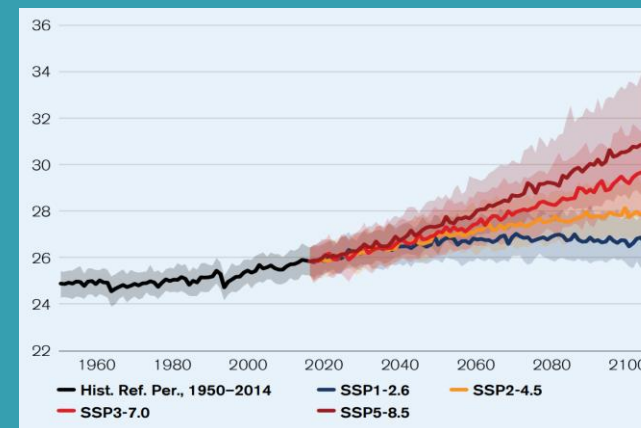
O clima está mudando...

As análises climáticas indicam que **o Brasil atravessa um processo consistente de aquecimento**, evidenciado pela concentração dos anos mais quentes da série histórica nas últimas décadas e pela tendência de elevação das temperaturas médias observada desde a década de 1960. Para o futuro projeta-se o aumento da temperatura e de ondas de calor em todas as regiões do país (MMA, MCTI e CC/PR, 2025). **Esse aumento da temperatura representa um importante fator de intensificação de diversas ameaças climáticas, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica, os padrões de precipitação e a ocorrência de eventos meteorológicos extremos.**

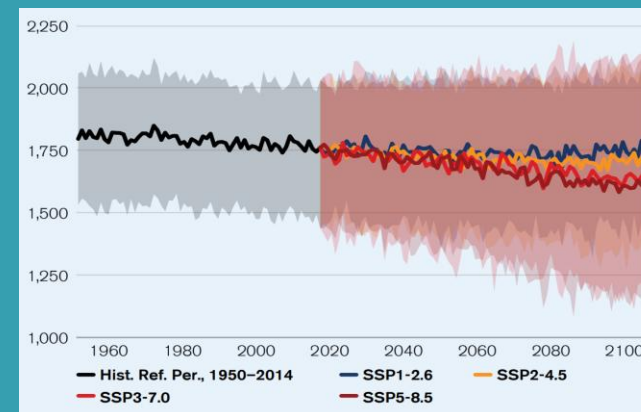
Entre as principais ameaças ao setor elétrico, destaca-se o **aumento da frequência e da duração das secas** nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste (MMA, MCTI e CC/PR, 2025). A **redução das precipitações** e das vazões naturais afluentes afeta diretamente a segurança hídrica e energética do país, dada a elevada dependência da matriz elétrica brasileira da geração hidrelétrica.

Ao mesmo tempo, o aquecimento da atmosfera tende a favorecer o desenvolvimento de sistemas convectivos mais intensos, **ampliando a ocorrência de tempestades severas associadas a descargas atmosféricas, ventos severos e precipitações extremas**. A ocorrência de eventos de **precipitação extrema** tende a se intensificar, principalmente no Sul, Sudeste e Norte (MMA, MCTI e CC/PR, 2025), indicando um futuro marcado por **maior variabilidade climática** e alternância entre períodos secos e chuvosos mais severos.

(A)



(B)



Projeção da temperatura média do ar na superfície para diferentes cenários de mudanças climáticas no Brasil (A) e precipitação anual projetada para o mesmo período (B). Fonte: WBG, 2025

...e as ameaças climáticas estão distribuídas por todo o Brasil.

O agravamento das condições de calor e seca também favorece a formação de um clima mais propício à ocorrência de incêndios florestais. Regiões com déficits hídricos recorrentes e temperaturas elevadas vêm registrando condições cada vez mais favoráveis à propagação de queimadas de grande extensão. Além disso, a maior incidência de descargas atmosféricas em áreas florestais pode contribuir para a ignição natural de incêndios, estabelecendo uma conexão direta entre diferentes ameaças climáticas.

Os ventos severos constituem outra ameaça relevante, especialmente por sua capacidade de provocar danos rápidos e localizados à infraestrutura e à população. Associados a tempestades convectivas, frentes frias, linhas de instabilidade e outros sistemas meteorológicos intensos, eventos como vendavais, micro explosões, ciclones extratropicais e tornados podem comprometer redes de transmissão e distribuição, causar interrupções de serviços essenciais e gerar prejuízos significativos.

Os efeitos das mudanças climáticas são interligados e amplificam os impactos sobre o território, a economia e a infraestrutura. Esse cenário de riscos múltiplos e simultâneos desafia as previsões tradicionais, dada a complexidade das interações entre variáveis atmosféricas, oceânicas e terrestres.



Tendências climáticas futuras para o Brasil

Fonte: Elaboração própria, a partir das informações de MMA, MCTI e CC/PR, 2025.

Essas ameaças provocam potenciais impactos...

Os efeitos das mudanças climáticas se estendem diretamente sobre todos os segmentos do sistema elétrico, desde a geração de energia elétrica, transmissão até o consumo final.

De maneira abrangente, essas **potenciais consequências adversas (riscos)** podem ser divididas em **quatro grupos**, considerando os efeitos sobre o recurso, eficiência de equipamentos, demanda e infraestruturas:

Para orientar a avaliação de riscos e em linha com as etapas anteriores do *Roadmap*, os principais aspectos relevantes à geração, transmissão e demanda de eletricidade no Brasil são apresentados considerando seis segmentos:



Redução da disponibilidade de recursos para geração

Variações nos padrões de precipitação, radiação solar e ventos impactam a oferta de recursos para geração de energia elétrica.



Redução da eficiência na geração ou transmissão

Mudanças climáticas implicam na redução da eficiência de equipamentos de geração e transmissão de energia elétrica.



Aumento da demanda por energia elétrica

Variações na temperatura influenciam a demanda de energia elétrica, sobretudo para conforto térmico.



Danos às infraestruturas

Eventos climáticos podem causar danos em infraestruturas, com consequências para o fornecimento de energia, vida útil de equipamentos ou segurança da população.



Geração Hidrelétrica



Geração Eólica



Geração Solar



Geração Térmica



Transmissão



Demanda

...para todos os segmentos do setor elétrico.

O quadro a seguir relaciona os **6 segmentos** com as **ameaças climáticas** e **riscos climáticos** mais relevantes, identificados através de pesquisa bibliográfica.

	 Geração Hidrelétrica	 Geração Eólica	 Geração Solar	 Geração Termelétrica	 Transmissão	 Demanda
 Aumento da temperatura média do ar	 Redução da eficiência  Redução da disponibilidade do recurso	 Redução da eficiência	 Redução da eficiência  Danos às infraestruturas	 Redução da eficiência  Redução da disponibilidade do recurso	 Redução da eficiência  Danos às infraestruturas	 Aumento da demanda média e máxima
 Aumento de temperaturas extremas e ondas de calor	 Redução da eficiência	 Redução da eficiência	 Redução da eficiência  Danos às infraestruturas	 Redução da eficiência  Redução da disponibilidade do recurso	 Redução da eficiência  Danos às infraestruturas	 Aumento da demanda média e máxima
 Redução da chuva média anual	 Redução da disponibilidade do recurso	-	-	 Redução da disponibilidade do recurso	-	-
 Aumento de secas	 Redução da disponibilidade do recurso	 Redução da eficiência	 Redução da eficiência	 Redução da eficiência  Redução da disponibilidade do recurso	 Danos às infraestruturas	-
 Aumento de chuvas extremas	 Redução da eficiência  Danos às infraestruturas	 Danos às infraestruturas	 Redução da disponibilidade do recurso  Danos às infraestruturas	 Redução da disponibilidade do recurso  Danos às infraestruturas	 Danos às infraestruturas	-
 Aumento de ventos severos	-	 Redução da eficiência  Danos às infraestruturas	 Danos às infraestruturas	-	 Danos às infraestruturas	-
 Aumento de condições favoráveis à ocorrência de incêndios	-	-	 Redução da disponibilidade do recurso  Danos às infraestruturas	 Redução da disponibilidade do recurso	 Danos às infraestruturas	-
 Aumento de descargas atmosféricas	-	 Danos às infraestruturas	 Danos às infraestruturas	-	 Danos às infraestruturas	-

As mudanças climáticas tendem a reduzir e tornar mais variável a capacidade de geração hidrelétrica brasileira.

O aumento da temperatura média global resulta em impactos nos sistemas de circulação atmosférica e no ciclo hidrológico, afetando, consequentemente, a precipitação. **Alterações nos padrões de precipitação, seja em quantidade, seja em sua distribuição sazonal e geográfica, podem afetar a disponibilidade de água para as hidrelétricas**, prejudicando a gestão dos reservatórios e a produção de energia elétrica.

Ademais, a geração de energia hidrelétrica depende não apenas do comportamento das chuvas, mas também de outros fatores como a **capacidade de regularização das vazões por meio de reservatórios** e dos demais usos da água na bacia hidrográfica. **Em bacias com conflitos pelo uso da água, cenários de secas intensas podem intensificá-los, reduzindo a disponibilidade de recursos e a flexibilidade operacional das hidrelétricas.**

Desse modo, as tendências de **redução da chuva média anual e de aumento da frequência e duração das secas apontam para uma menor disponibilidade do recurso hídrico, podendo reduzir a geração hidrelétrica.** Esse risco se mostra especialmente

relevante em função da expressiva participação da geração hidrelétrica na matriz elétrica brasileira e dos atributos que essa fonte agrega ao sistema, como armazenamento e flexibilidade operativa.

A ocorrência de **chuvas extremas** também pode afetar a geração hidrelétrica. **A maior afluência pode provocar vertimentos, deplecionamento para controle de cheias e desligamentos, reduzindo a geração.** Além disso, **a elevação do nível d'água a jusante das usinas reduz a queda líquida, diminuindo o potencial de geração hidrelétrica.** Os reservatórios também podem ter seu volume útil reduzido pelo **assoreamento** provocado por essas chuvas. Em casos extremos, podem ocorrer **danos às infraestruturas**, pondo em risco a **segurança de barragens.**

Temperaturas do ar mais altas podem reduzir a disponibilidade do recurso hídrico através do aumento das perdas por evaporação, principalmente em reservatórios de grande superfície alagada. Outro potencial efeito do aumento da temperatura é a redução da eficiência dos equipamentos.

IMPACTOS PARA A GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

DISPONIBILIDADE DE RECURSO

- A redução da chuva média anual, o aumento da frequência e duração das secas e o aumento da temperatura podem reduzir a disponibilidade do recurso hídrico.

EFICIÊNCIA DE EQUIPAMENTOS

- Altas temperaturas e ondas de calor podem provocar a redução da eficiência dos equipamentos.
- Chuvas extremas podem reduzir a eficiência na geração das usinas.

DANOS ÀS INFRAESTRUTURAS

- Chuvas extremas podem danificar as infraestruturas.

O aumento das temperaturas e de ondas de calor podem reduzir a eficiência da geração solar fotovoltaica.

IMPACTOS PARA A GERAÇÃO SOLAR

DISPONIBILIDADE DE RECURSO

- Queimadas podem aumentar a concentração de particulados na atmosfera, reduzindo a geração.
- Secas podem provocar acúmulo de particulado sobre os painéis que pode reduzir a geração.

EFICIÊNCIA DE EQUIPAMENTOS

- Altas temperaturas e ondas de calor podem reduzir a eficiência dos equipamentos.

DANOS ÀS INFRAESTRUTURAS

- Altas temperaturas e ondas de calor podem provocar a degradação dos equipamentos.
- Chuvas extremas, ventos severos e descargas atmosféricas podem danificar infraestruturas.

A geração de energia fotovoltaica depende diretamente da irradiância solar, quantidade de radiação solar que pode ser convertida em eletricidade e que é diretamente influenciada por diversos fatores climáticos, como estações do ano, condições meteorológicas, nebulosidade e poluentes atmosféricos.

Projeções climáticas indicam um **aumento da radiação solar na superfície em diversas regiões do Brasil**, embora a magnitude desses efeitos seja incerta.

O aumento da temperatura e ondas de calor, porém, representam uma ameaça para a geração fotovoltaica. **A eficiência da geração diminui à medida que a temperatura aumenta, podendo neutralizar eventuais ganhos decorrentes do aumento na irradiação** (GIZ e EPE, 2025), e temperaturas extremas podem provocar a degradação dos componentes e deterioração da infraestrutura de geração.

O aumento da nebulosidade associado ao aumento das chuvas extremas reduz a irradiação solar, diminuindo a

geração fotovoltaica. De modo similar, o clima favorável a incêndio (altas temperaturas, clima seco e incidência de ventos), favorece a **ocorrência de queimadas, que podem danificar usinas e aumentar a emissão de particulados na atmosfera, reduzindo a geração.**

O aumento da frequência e duração das secas também pode reduzir a disponibilidade de água para a limpeza dos módulos, causando **acúmulo de particulado sobre os painéis e reduzindo a geração.**

Além disso, **chuvas intensas, descargas atmosféricas e ventos fortes podem oferecer danos às infraestruturas de geração solar**, em particular a MMGD (Micro e Minigeração Distribuída) por possuírem, de modo geral, menor robustez.

Por outro lado, eventuais danos tendem a ser absorvidos pelo sistema, em virtude da dispersão geográfica dos empreendimentos.

Os recursos eólicos não devem ser alterados de forma significativa, mas eventos extremos podem afetar a infraestrutura de geração.

O recurso eólico é determinado por processos atmosféricos complexos que devem ser impactados pelas mudanças climáticas: transformações nos padrões de circulação global podem alterar as **velocidades médias dos ventos de superfície** e **intensificar a ocorrência de ventos extremos**.

Mudanças no regime de ventos podem influenciar a geração eólica, afetando o desempenho das turbinas, o fator de capacidade, a estabilidade da produção e até a previsibilidade da oferta energética ao longo do tempo.

Apesar disso, os **recursos para geração eólica no Brasil não devem ser substancialmente afetados pelas mudanças climáticas**, com projeções apresentando grande incerteza regional e entre modelos climáticos (GIZ e EPE, 2025). Ademais, em geral os efeitos da mudança climática sobre o potencial eólico são pequenos quando comparados à variabilidade associada a processos naturais (EPRI, 2023).

Em condições de alta velocidade do vento, porém, a produção pode ser interrompida por razões de segurança, com risco de falha das turbinas e danos a

componentes dos aerogeradores em velocidades extremas.

O aumento da temperatura e duração das secas também pode afetar turbinas eólicas, reduzindo a eficiência dos aerogeradores e equipamentos por conta de temperaturas extremas e aumento de **particulados no ar**.

Mudanças nos padrões de precipitação tendem a não ter efeitos significativos sobre a geração eólica, mas **chuvas extremas podem causar inundações, afetar infraestruturas e dificultar o acesso para manutenção**. Descargas atmosféricas podem danificar as pás das turbinas, mas esse impacto pode ser evitado por sistemas de proteção adequados.

Nesse contexto, observa-se que, **embora eventos extremos possam causar impactos localizados sobre a infraestrutura eólica, tais ocorrências não tendem a comprometer significativamente o desempenho do sistema** elétrico brasileiro como um todo, uma vez que seus efeitos são pontuais e passíveis de absorção pela operação integrada do sistema.

IMPACTOS PARA A GERAÇÃO EÓLICA

EFICIÊNCIA DE EQUIPAMENTOS

- Altas temperaturas, ondas de calor e aumento de secas podem provocar a redução da eficiência dos equipamentos.
- Ventos severos podem causar interrupções na geração.

DANOS ÀS INFRAESTRUTURAS

- Chuvas extremas, ventos severos e descargas atmosféricas podem causar danos à infraestrutura de geração eólica.

A geração termelétrica tende a enfrentar desafios relacionados à sua eficiência, confiabilidade e disponibilidade de capacidade.

IMPACTOS PARA A GERAÇÃO TERMELÉTRICA

DISPONIBILIDADE DE RECURSOS

- Alterações nas condições de cultivo e produtividade podem afetar a oferta de bioeletricidade.
- Alterações nos regimes hidrológicos podem restringir o transporte de combustíveis para abastecimento das termelétricas, principalmente em sistemas isolados.

EFICIÊNCIA DE EQUIPAMENTOS

- Altas temperaturas e ondas de calor podem reduzir a eficiência dos equipamentos
- O aumento de secas pode reduzir a disponibilidade de água para resfriamento, afetando a eficiência.

DANOS ÀS INFRAESTRUTURAS

- Chuvas extremas podem danificar instalações.

As termelétricas fornecem atributos fundamentais em situações críticas, como flexibilidade operativa e capacidade de reserva, relevantes para o sistema como um todo. Em cenários de escassez hídrica e picos de demanda por calor extremo, o acionamento de termelétricas representa a possibilidade de garantir o suprimento de energia.

Entretanto, **o aumento da temperatura pode comprometer a geração das usinas, prejudicando principalmente a sua eficiência.**

Ainda em termos de eficiência, diversas **termelétricas utilizam água em seus sistemas de resfriamento, sendo suscetíveis à menor disponibilidade hídrica decorrente do aumento de secas.**

No caso das usinas a biomassa, há grande incerteza sobre a disponibilidade futura do recursos: os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura variam por região, cultura e

sistema produtivo e podem ter efeitos negativos ou positivos, o que dificulta a análise.

De modo geral, as principais ameaças climáticas para a biomassa são aquelas que podem alterar as condições de cultivo, reduzindo a disponibilidade do recurso (aumento das temperaturas, redução das chuvas e aumento das secas e aumento das condições favoráveis a incêndios).

Além de danos às infraestruturas, chuvas extremas podem inviabilizar o transporte rodoviário, enquanto alterações no regime hidrológico, como o aumento das secas, podem impactar o transporte fluvial, afetando a disponibilidade de recursos para a geração termelétrica em determinados locais.

O aspecto da logística de combustíveis se mostra especialmente relevante para os Sistemas Isolados, onde interrupções no transporte podem comprometer a segurança do suprimento.

A infraestrutura de transmissão pode sofrer danos físicos, sobretudo devido ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos.

Pelas suas próprias características construtivas (linhas e subestações aéreas), bem como por estar amplamente distribuído em todas as regiões do Brasil, o sistema de transmissão está exposto a ameaças climáticas diversas.

O aumento da temperatura média e das ondas de calor podem reduzir a capacidade de transporte das linhas de transmissão e aumentar as perdas elétricas, bem como acelerar a degradação de alguns materiais e acelerar o desgaste das estruturas ao longo do tempo.



Temperaturas extremas e ondas de calor aumentam a demanda por climatização de ambientes, trazendo risco de sobrecarga à rede de transmissão.

Já condições prolongadas de seca favorecem o acúmulo de partículas, poeira e poluentes sobre isoladores e componentes expostos, aumentando o risco de curtos-circuitos.

Quando combinadas, temperaturas extremas e secas aumentam o **risco de incêndios, que é uma das causas mais comuns de desligamentos na rede de transmissão, podendo causar danos físicos diretos.**

Chuvas extremas podem provocar danos diretos à infraestrutura, como a inundação de subestações ou deslizamentos e queda de torres, provocados pela erosão ao redor das fundações. Indiretamente, as chuvas extremas podem dificultar o acesso a áreas afetadas, prolongando o tempo de interrupção.

As descargas atmosféricas representam um risco significativo para a transmissão de energia, sendo a principal causa de interrupções de serviço e danos físicos à infraestrutura. Entretanto há uma grande dificuldade em realizar projeções futuras precisas sobre descargas atmosféricas, que decorrem de uma combinação de diversos fatores.

Similarmente, **ventos severos são uma das principais causas climáticas de desligamentos da rede de transmissão, podendo danificar estruturas ou provocar queda de torres de linhas de transmissão.**

IMPACTOS PARA A TRANSMISSÃO

DANOS ÀS INFRAESTRUTURAS

- Altas temperaturas e ondas de calor podem reduzir a vida útil de equipamentos.
- Chuvas extremas, ventos severos e descargas atmosféricas podem danificar estruturas ou provocar queda de torres de transmissão.
- Secas favorecem a deposição de partículas nos isoladores, aumentando o risco de curto-circuito.
- Altas temperaturas, clima seco e incidência de ventos aumentam a probabilidade de queimadas que podem atingir o sistema de transmissão.

EFICIÊNCIA DE EQUIPAMENTOS

- Temperaturas elevadas reduzem a eficiência das linhas e transformadores.
- Altas temperaturas e ondas de calor provocam um aumento no consumo, podendo sobrecarregar a rede de transmissão.

O aumento da temperatura média e da ocorrência e duração de ondas de calor tendem a elevar o consumo e os picos de demanda por energia.

No contexto das mudanças do clima, **o uso de energia para resfriamento de ambientes deve contribuir cada vez mais para a demanda por eletricidade**. Estima-se que ocorra um crescimento tanto da posse quanto do uso de aparelhos de ar-condicionado em função do aumento da temperatura do ar e de ondas de calor e, em menor grau, a redução do uso de equipamentos para aquecimento de ambientes e de água.

Temperaturas extremas e ondas de calor devem provocar impactos severos sobre a frequência e intensidade das cargas máximas, produzindo elevações abruptas e picos de carga mais elevados. Esses picos trazem complexidade para a operação do sistema, pois exigem respostas operativas rápidas, como o acionamento de térmicas fósseis, capacidade adicional de geração e flexibilidade do sistema elétrico brasileiro.

Outro desafio relevante é a **redução da eficiência dos equipamentos**. **Temperaturas mais elevadas diminuem o desempenho de aparelhos de refrigeração e climatização**, como geladeiras, freezers e aparelhos de ar-condicionado, aumentando seu consumo de energia para a prestação do mesmo nível de serviço.

Ainda, de forma secundária, e em magnitude inferior ao impacto da climatização, **a maior duração e recorrência de períodos de seca pode provocar um aumento da demanda de energia elétrica associada ao bombeamento de água para abastecimento e irrigação**.

IMPACTOS PARA A DEMANDA

DEMANDA POR ELETRICIDADE

- Altas temperaturas e maior duração de ondas de calor podem provocar aumento acima do previsto nas demandas média e máxima.



Avaliação de Riscos Climáticos

A avaliação integrada dos riscos oferece a base para orientar a tomada de decisão frente às ameaças climáticas.

A metodologia desenvolvida pela EPE para a **avaliação de riscos climáticos** no setor elétrico brasileiro combina **análises qualitativas**, apresentadas na seção anterior, e **qualiquantitativas**, considerando a interação entre ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidade em diferentes cenários de mudança do clima.

Com foco em **riscos sistêmicos em escala nacional**, foram avaliadas oito ameaças climáticas relevantes, abrangendo riscos crônicos e agudos. A partir da **análise da exposição dos ativos** e da **vulnerabilidade dos segmentos**, incluindo sua importância para o SIN, foi possível **identificar os riscos mais relevantes para o sistema**, gerando **subsídios para o planejamento e a formulação de estratégias de adaptação às mudanças climáticas**.

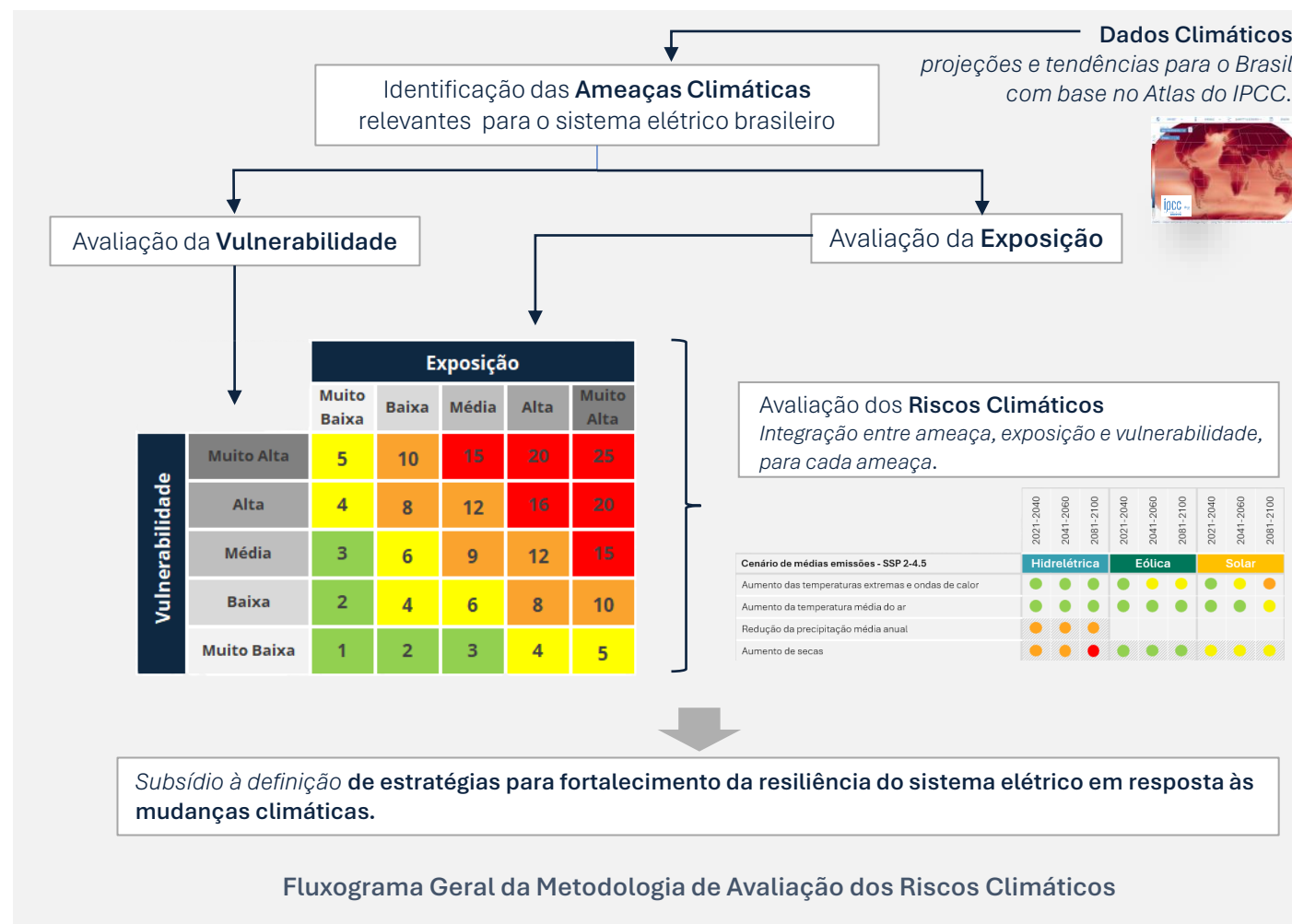
O risco climático é avaliado pela interação entre ameaça, exposição e vulnerabilidade.

Com base no referencial teórico, a EPE desenvolveu uma **metodologia qualiquantitativa para classificação de riscos climáticos**, estruturada a partir da interação entre **ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidade**, e considerando cenários variados de mudanças climáticas.

Foram adotadas as seguintes premissas de análise:

- **Escala nacional:** foco em riscos sistêmicos, e não em ativos ou regiões específicas; A distribuição de energia em baixa tensão até as residências e pequenos consumidores não é tratada nesta publicação.
- Análise baseada na **configuração atual** do sistema, sem considerar expansões ou novas tecnologias.

Tendo por base essas premissas, na sequência serão apresentadas as etapas de **Avaliação da Exposição e Avaliação da Vulnerabilidade**.



A avaliação dos riscos parte da seleção das ameaças climáticas mais relevantes...

	Aumento da temperatura média do ar	Variação (°C) da temperatura média do ar na superfície (T)
	Aumento de temperaturas extremas e ondas de calor	Variação (dias) do número de dias com temperatura máxima acima de 35°C (TX35)
	Redução da precipitação média anual	Variação (%) do Índice Padronizado de Precipitação – 6 meses (SPI-6), considerando valores negativos (seca)
	Aumento de secas	Variação (dias) do número de dias secos consecutivos (CDD)
	Aumento das condições favoráveis à ocorrência de incêndios	Variação (dias) do número de dias secos consecutivos (CDD)
	Aumento de ventos severos	Variação (%) do vento médio na superfície (SW)
	Aumento de chuvas extremas	Variação (%) da precipitação máxima de 1 dia (RX1day)
	Aumento de descargas atmosféricas (raios)	Variação (%) da precipitação máxima de 1 dia (RX1day)

A partir da avaliação das tendências climáticas para o Brasil, com base nos cenários do IPCC e nas informações do Plano Clima - Adaptação, foram selecionadas **8 ameaças climáticas relevantes para a avaliação dos riscos climáticos**.

As ameaças selecionadas foram aquelas que tem potencial de gerar efeitos adversos em ativos ou na operação do sistema, e para as quais há evidências suficientes de alteração nas condições climáticas futuras.

Essas ameaças podem representar:

- **riscos crônicos**, ou seja, aqueles que se referem a mudanças graduais e de longo prazo nos padrões climáticos, como o aumento da temperatura.
- **riscos agudos**, ou seja, aqueles desencadeados por eventos pontuais e relacionados a eventos extremos, como chuvas intensas e ondas de calor.

Para cada ameaça, foi definida uma variável climática representativa a partir dos dados disponíveis no Atlas do IPCC. Cabe destacar que algumas das ameaças elencadas (aumento de descargas atmosféricas, aumento das condições favoráveis a incêndios e aumento de ventos severos) não possuem projeções diretas no Atlas e, portanto, foram avaliadas com base em variáveis correlatas.

...cujas projeções futuras são sobrepostas ao sistema elétrico existente...

A exposição foi avaliada por meio da **sobreposição espacial entre as projeções das variáveis climáticas e a localização dos ativos ou da população**.

A análise baseia-se nas projeções climáticas **do CMIP6/IPCC AR6**, a partir dos **dados da mediana do ensemble de modelos do Atlas Interativo** (IPCC, 2021), ajudando a quantificar a tendência central e a incerteza do clima futuro. O resultado é a variação do valor da ameaça, em relação ao período de referência histórico.

Cenários considerados:

- SSP 1-2.6
- SSP 2-4.5
- SSP 3-7.0
- SSP 5-8.5

Horizontes Temporais:

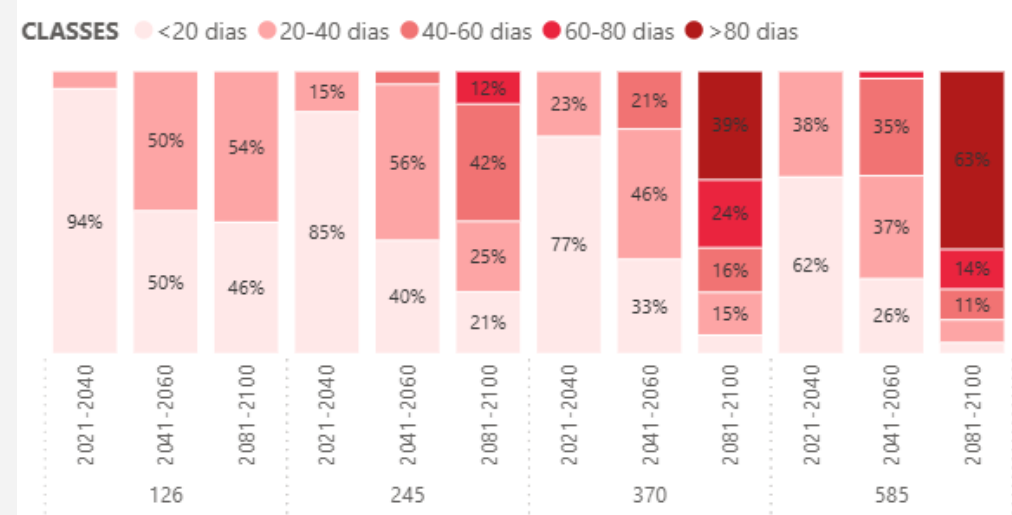
- Curto prazo: 2021-2040
- Médio prazo: 2041-2060
- Longo prazo: 2081-2100

Referência histórica: 1995-2014.

O gráfico abaixo traz um exemplo do resultado dessa sobreposição, para o sistema de transmissão e a ameaça “Aumento de temperaturas extremas e ondas de calor”, utilizando a variável do IPCC, *Variação do número de dias com temperatura máxima acima de 35°C (TX35)*. A classificação da exposição foi feita em 5 níveis, de muito baixa a muito alta exposição.

As barras mostram o percentual da extensão total do sistema de transmissão exposto às classes da ameaça para cada cenário de emissão e período avaliados. Neste exemplo, para o cenário SSP 1-2.6 e horizonte 2021-2040, 94% do sistema de transmissão está na classe muito baixa exposição (<20 dias com temperatura máxima acima de 35°C em relação ao período histórico).

Esse mesmo cruzamento foi feito para as 8 ameaças climáticas e 6 segmentos, gerando um conjunto de classificações espacializadas que permitiu a análise integrada da exposição do sistema elétrico.



Ameaça: aumento de temperaturas extremas e ondas de calor / Segmento: transmissão
Variável: Variação (dias) do número de dias com temperatura máxima acima de 35°C (TX35)

...permitindo visualizar espacialmente a exposição dos segmentos às tendências climáticas.

(A) CLASSES ● <5 dias ● 10-15 dias ● 5-10 dias ● 15-20 dias



Neste exemplo de mapas gerados, cada círculo representa um ativo de geração, e o tamanho é proporcional à potência instalada. **A intensidade das cores representa o nível de exposição à ameaça climática** para o cenário de emissões e período avaliado.

(B) CLASSES ● <5 ● 5-10 % ● 10-20 %



Nos mapas ao lado, tem-se a **exposição das hidrelétricas** ao:

(A) Aumento de secas e das condições favoráveis à ocorrência de incêndios. Variável IPCC: CDD

(B) Aumento de chuvas extremas e de descargas atmosféricas. Variável IPCC: RX1day.

*Cenário de emissões SSP 3-7.0 e período 2041-2060.

- Para a **geração hidrelétrica**, as regiões Norte e parte do Centro-Oeste estão expostas a **aumento de secas e condições favoráveis a incêndios**. Já aquelas localizadas **no Sul estão mais expostas a chuvas extremas**.
- Em relação à **geração eólica**, que se concentra nas regiões Nordeste e Sul, a **exposição ao aumento dos ventos severos** se mostrou um pouco mais alta para alguns empreendimentos na região Sul.
- Para a **geração solar**, temperaturas extremas e ondas de calor afetam, de maneira generalizada, as regiões onde há geração centralizada (Nordeste e Sudeste). Já a exposição à seca acontece em regiões do interior do Nordeste.
- As **usinas termelétricas** se encontram bem distribuídas por todo o território nacional. A **diminuição da precipitação anual e o aumento de secas se mostrou mais relevante para as regiões Norte e Nordeste**.
- Grande parte da rede de **transmissão** se concentra em **regiões expostas a aumento de ventos severos, chuvas extremas e descargas atmosféricas (Sul e Sudeste)**. Apesar disso, a elevada interconectividade da malha nestas regiões pode atenuar eventuais impactos. Em contrapartida, a rede **das regiões Centro-Oeste, Norte e do interior do Nordeste está mais exposta a condições favoráveis a incêndios**.
- A **demand**a é especialmente sensível ao aumento da **temperatura e ondas de calor, que se intensificam em direção ao interior do país**. Apesar do maior aumento da temperatura estar na região central do país, a distribuição da população ocorre de maneira inversa, **com grandes centros de consumo no litoral**.

A exposição depende diretamente do cenário climático e da distribuição espacial do segmento.



Evolução climática

Quanto mais intenso o aquecimento projetado e mais distante o horizonte temporal, maior a exposição dos segmentos às ameaças climáticas.

A **exposição cresce progressivamente em todos os segmentos** à medida que se avança para **cenários mais pessimistas e horizontes mais distantes**, evidenciando a influência da intensidade das mudanças climáticas sobre o sistema elétrico brasileiro.

Nos **cenários SSP1-2.6 e SSP2-4.5**, os **níveis de exposição permanecem predominantemente “muito baixos” ou “baixos”**, mesmo no final do século. Já nos cenários de maiores emissões, especialmente **SSP5-8.5**, **observa-se o aumento da exposição em todos os segmentos**, com destaque para as ameaças relacionadas ao **aumento da temperatura média, temperaturas extremas, aumento de chuvas extremas e descargas atmosféricas**, em que todos os segmentos alcançam as classes “alta” e “muito alta” no longo prazo.



Distribuição espacial

Quanto maior a sobreposição entre a localização dos ativos ou população e as áreas projetadas para sofrer alterações climáticas, maior tende a ser a exposição.

A **exposição também está relacionada com a localização dos ativos e dos consumidores em relação às áreas afetadas pelas mudanças climáticas**.

A **geração hidrelétrica e a transmissão figuram entre os segmentos com maiores valores de exposição**, refletindo a coincidência espacial entre grande parcela da capacidade instalada de geração e da extensão de linhas de transmissão em regiões cujas projeções climáticas apontam para alterações climáticas significativas. Em contraste, os empreendimentos eólicos e solares apresentam exposição relativamente menor em função de sua maior concentração espacial.

A vulnerabilidade representa a propensão de cada segmento e do sistema elétrico a ser afetado negativamente pela ameaça climática...

A **vulnerabilidade** envolve os seguintes aspectos:

Sensibilidade ou susceptibilidade ao dano do segmento:

- Relação causal entre a ameaça climática e desempenho do segmento ou a possibilidade de danos à infraestrutura.

Capacidade adaptativa e de resposta do segmento e do sistema:

- Robustez, ou capacidade de suportar alterações climáticas sem perda de função;
- Redundâncias, ou alternativas técnicas, operacionais ou sistêmicas que permitam compensar alterações climáticas;
- Flexibilidade, capacidade de ajuste de curto prazo diante das ameaças climáticas; e
- Capacidade de resposta e recuperação, associada a eventos extremos e à rápida recomposição das funções;

Importância sistêmica do segmento para a segurança elétrica:

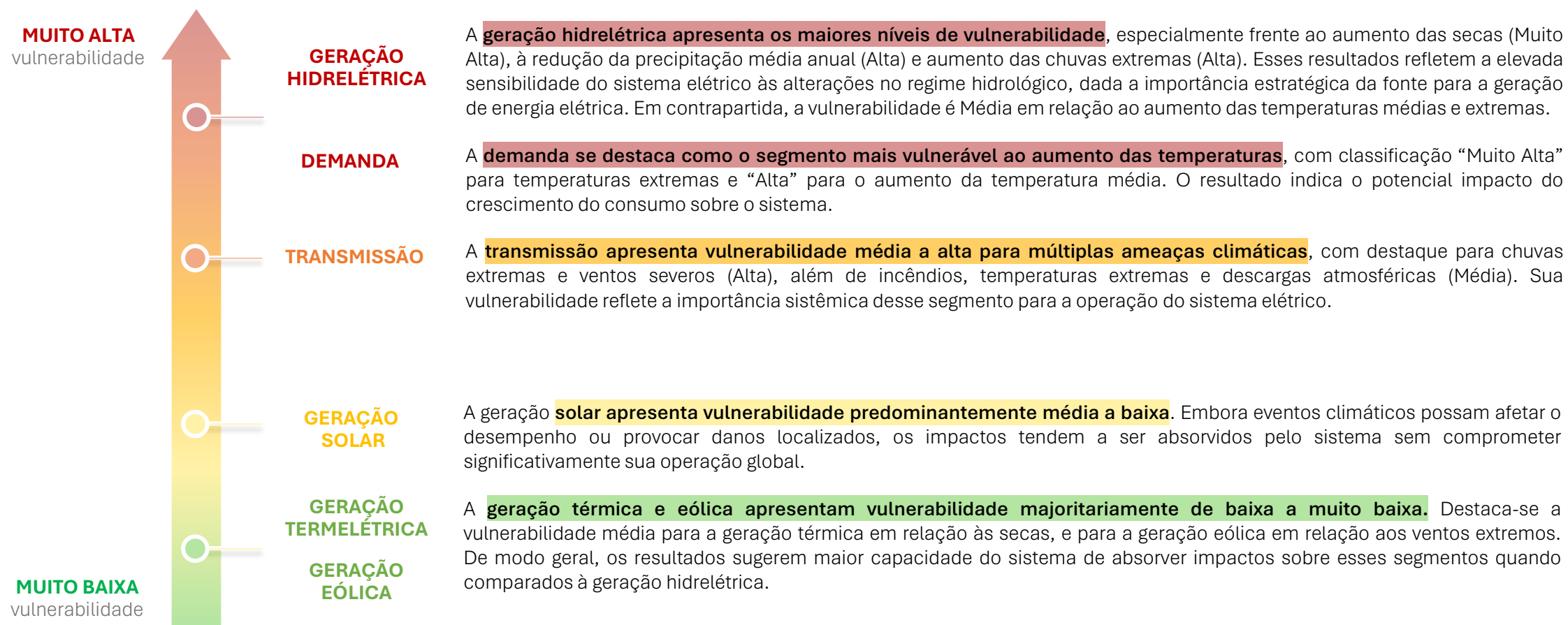
- Caso este segmento sofra dano, qual é a relevância para a operação e a segurança do sistema elétrico.

A **avaliação da vulnerabilidade** foi feita com o apoio de diversos **especialistas** que, em uma **Oficina Participativa** interna, classificaram a vulnerabilidade de cada segmento às ameaças climáticas.

Nível	Classificação	Descrição	Descrição Detalhada
1	Muito Baixa	Baixa sensibilidade + alta capacidade adaptativa	A ameaça não afeta significativamente o desempenho, consumo ou infraestrutura. Impactos são desprezíveis e facilmente absorvidos.
2	Baixa	Média sensibilidade + alta capacidade adaptativa	A ameaça pode causar alterações leves no desempenho, consumo ou danos pontuais. Impactos são facilmente absorvidos pelo sistema elétrico.
3	Média	Alta sensibilidade + alta capacidade adaptativa	A ameaça pode causar alterações significativas. Impactos são absorvidos pelo sistema com esforços temporários.
4	Alta	Alta sensibilidade + média capacidade adaptativa	A ameaça pode causar alterações significativas. Impactos são absorvidos com esforços prolongados.
5	Muito Alta	Alta sensibilidade + baixa capacidade adaptativa	Sistema com alta dependência do segmento. A ameaça pode causar alterações significativas e danos relevantes. Impactos requerem recuperação lenta e exigem mudanças estruturais.

...e é diferente para os segmentos do sistema elétrico.

A nota de vulnerabilidade foi atribuída para cada segmento e para cada ameaça climática e considera a configuração atual do sistema, mantendo-se constante ao longo do tempo. De maneira geral, os resultados indicam que:



A integração entre ameaça, exposição e vulnerabilidade compõe a matriz de risco...

	2021-2040	2041-2060	2081-2100	2021-2040	2041-2060	2081-2100	2021-2040	2041-2060	2081-2100	2021-2040	2041-2060	2081-2100	2021-2040	2041-2060	2081-2100	2021-2040	2041-2060	2081-2100
Cenário de médias emissões - SSP 2-4.5	Hidrelétrica	Eólica	Solar	Térmica	Transmissão	Demanda												
Aumento das temperaturas extremas e ondas de calor	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aumento da temperatura média do ar	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Redução da precipitação média anual	●	●	●				●	●	●									
Aumento de secas	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Aumento de chuvas extremas	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Aumento de ventos severos				●	●	●	●	●	●				●	●	●			
Aumento das condições favoráveis à ocorrência de incêndios				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Aumento de descargas atmosféricas (raios)				●	●	●	●	●	●				●	●	●			

Cenário de altas emissões - SSP 5-8.5	Hidrelétrica	Eólica	Solar	Térmica	Transmissão	Demanda												
Aumento das temperaturas extremas e ondas de calor	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Aumento da temperatura média do ar	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Redução da precipitação média anual	●	●	●				●	●	●									
Aumento de secas	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Aumento de chuvas extremas	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Aumento de ventos severos				●	●	●	●	●	●				●	●	●			
Aumento das condições favoráveis à ocorrência de incêndios				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
Aumento de descargas atmosféricas (raios)				●	●	●	●	●	●				●	●	●			

O cruzamento das informações apresentadas anteriormente resulta na matriz de risco.

Cada círculo representa o grau de risco de um segmento frente a uma ameaça climática, classificado de Risco Baixo a Risco Muito Alto. São apresentados os resultados para as ameaças que representam um ou mais riscos significativos para os segmentos e para o sistema elétrico (Página 26).

Campos hachurados indicam que há baixo consenso (<80% dos modelos concordam com o sinal da mudança das projeções), de acordo com a representação da “[Incerteza Simples](#)” do Atlas Interativo do IPCC.

Para apresentar a incerteza das projeções por segmento, foi calculada a média ponderada do consenso considerando a região onde se concentram os ativos.

● Risco Baixo

● Risco Alto

● Risco Médio

● Risco Muito Alto

▨ Baixo Consenso

...que possibilita classificar os riscos e avaliar sua evolução em diferentes cenários de emissões e períodos.

A análise da matriz de riscos permite concluir que:

A magnitude do risco depende tanto da vulnerabilidade dos segmentos quanto da evolução da exposição às mudanças climáticas.

O risco pode permanecer nas classes mais baixas quando há pouca exposição (não são projetadas alterações significativas nas condições climáticas futuras para o período e cenário analisado) ou quando o segmento apresenta baixa sensibilidade à ameaça e elevada capacidade adaptativa. O crescimento do risco ao longo do tempo está associado ao crescimento da exposição.

As principais ameaças estão relacionadas ao aumento das temperaturas extremas e ondas de calor, de chuvas extremas e das secas, que podem afetar simultaneamente diversos segmentos.

Essas ameaças concentram a **maior parte das classificações de risco médio, alto e muito alto** observadas na matriz, destacando-se como os principais vetores de impacto para o sistema elétrico brasileiro.

Os riscos climáticos se tornam mais severos em cenários de maiores emissões e em horizontes de tempo mais distantes.

No curto prazo (2021-2040), predominam riscos classificados como baixos e médios, com alguns casos de risco alto já observados, em especial para a demanda, a geração hidrelétrica e a transmissão. À medida que a exposição aumenta ao longo do tempo e em cenários de altas emissões, surgem classificações de risco Muito Alto.

Algumas ameaças apresentam maior incerteza nas projeções futuras.

Grande parte dos resultados apresenta baixa concordância de sinal (consenso), especialmente para ameaças que tem maior variabilidade espacial e temporal, como aquelas relacionadas à precipitação. Cabe apontar que os dados utilizados do Atlas do IPCC apresentam o consenso a nível local, por isso, agregações regionais devem ser interpretadas com cautela. Dessa forma, o consenso é apresentado como um indicador qualitativo de incerteza e não integra diretamente o cálculo do risco. Por fim, ressalta-se que **baixo consenso não significa ausência de mudança projetada.**

Sob o ponto de vista sistêmico, a transmissão, a geração hidrelétrica e a demanda são os segmentos com maiores riscos climáticos...

O somatório dos graus de risco de todos os cenários e períodos permite fazer uma **análise global dos riscos**, através dos **gráficos de radar** ao lado. Quanto **maior a pontuação**, **maior o risco acumulado por segmento**, e mais a linha se aproxima da borda do gráfico.

Nota-se que a **Transmissão e a Geração Hidrelétrica alcançam altas pontuações de risco**, mas as ameaças relacionadas são diferentes: para a geração hidrelétrica são mais relevantes a redução da precipitação média anual, o aumento de secas e chuvas extremas, enquanto para a transmissão, o aumento de ventos severos, descargas atmosféricas e chuvas extremas. Os impactos e extensão dos danos podem interferir tanto no ativo quanto na operação do sistema.

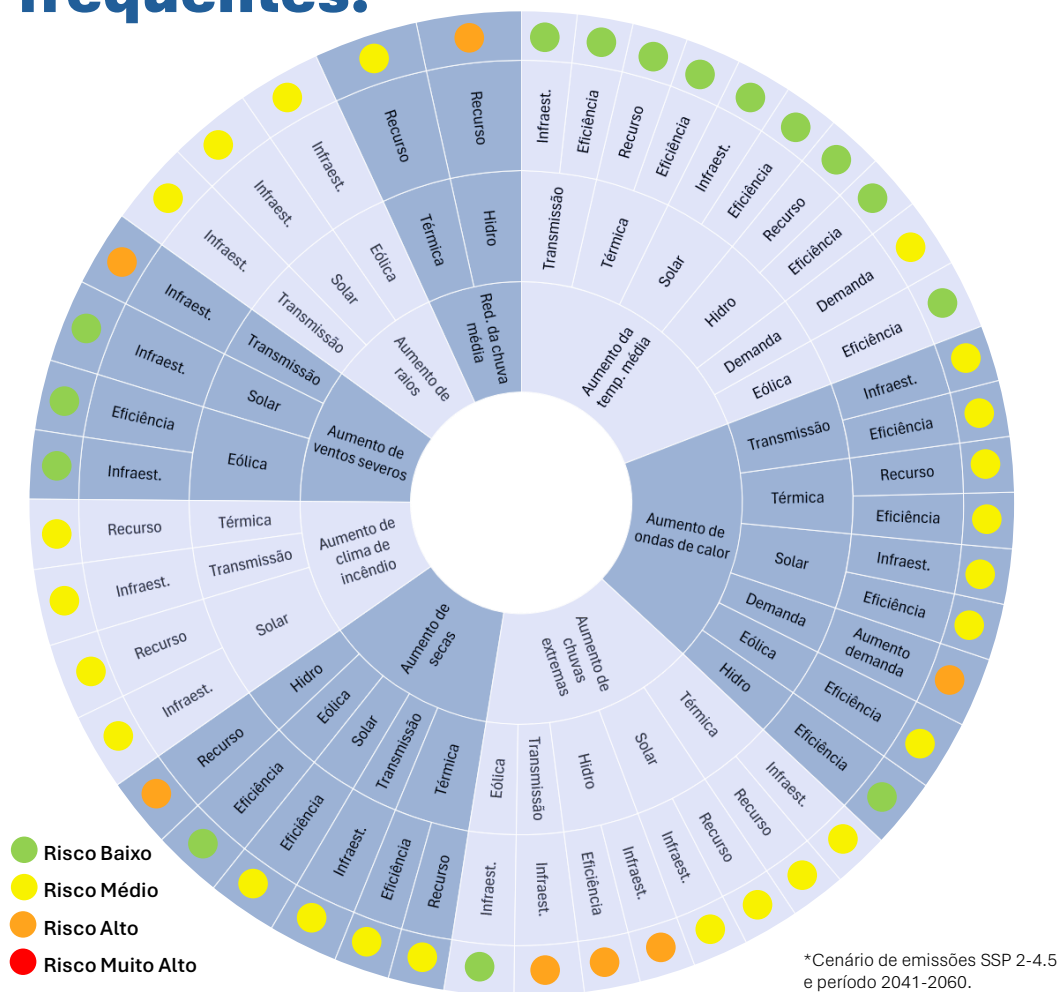
Para a **Demanda**, o **aumento de temperaturas extremas é extremamente relevante**, apresentando **alto grau de risco** para o sistema.

Ameaças:

- | | |
|--|---|
|  Aumento das temperaturas extremas e ondas de calor |  Aumento de chuvas extremas |
|  Aumento da temperatura média do ar |  Aumento de descargas atmosféricas |
|  Aumento da frequência e duração das secas |  Aumento de ventos severos |
|  Redução da chuva média anual |  Aumento de condições favoráveis à ocorrência de incêndios |



...e a redução de eficiência e dano à infraestrutura são os riscos mais frequentes.



O gráfico ao lado decompõe, para cada ameaça climática, os segmentos afetados e os riscos associados:

- Redução da disponibilidade de recursos
- Redução da eficiência da geração e transmissão
- Danos às infraestruturas
- Aumento da demanda por energia elétrica

Considerando a classificação de risco para o **cenário de médias emissões (SSP 2-4.5)** e o **período de médio prazo (2041-2060)**, observa-se que alguns riscos se destacam, chegando a pontuações classificadas como **risco alto**.

A **menor disponibilidade do recurso para geração hidrelétrica** e o **aumento da demanda por energia** representam **risco alto**. A redução do recurso hídrico está vinculada a ameaças ligadas à precipitação, enquanto o aumento da demanda está associado ao aumento das ondas de calor.

Dano à infraestrutura é o **risco mais frequente**, com as **infraestruturas de transmissão** alcançando **risco alto**, quando se trata de ameaças de eventos extremos (chuvas e ventos), assim como as **hidrelétricas**, quando se trata do aumento de chuvas extremas.

A **redução da eficiência da geração e transmissão** é outro risco frequente, sendo associado a diversas ameaças, principalmente as relacionadas à **temperatura**.

*Cenário de emissões SSP 2-4.5 e período 2041-2060.

A sobreposição de diferentes ameaças pode amplificar os impactos no sistema elétrico.

Em nível sistêmico, a coincidência de picos de consumo com períodos de menor disponibilidade de recursos hídricos cria uma sobreposição crítica entre oferta reduzida e demanda elevada (GIZ e EPE, 2025), especialmente no Brasil, onde as ondas de calor podem coincidir com o início do verão, quando reservatórios ainda estão com níveis baixos de armazenamento. Além disso, a demanda máxima durante ondas de calor pode coincidir com a redução da capacidade de transmissão e distribuição em temperaturas altas (IPCC, 2022).

Algumas ameaças mantêm **risco médio** constante nos três períodos avaliados. Embora não se destaquem de forma isolada, a interação entre seus impactos pode potencializar os efeitos negativos sobre o sistema.

Considerando a classificação de risco para o **cenário de médias emissões (SSP 2-4.5)**, os riscos mais significativos são:

Riscos Altos no Curto Prazo (2021-2040)



Redução da disponibilidade hídrica para a geração hidrelétrica

Ameaças associadas:
Redução da precipitação média e aumento das secas



Aumento da demanda de energia elétrica

Ameaça associada:
Aumento das temperaturas extremas e ondas de calor



Danos às infraestruturas da transmissão

Ameaças associadas:
Aumento das chuvas extremas e dos ventos severos



Risco à segurança da infraestrutura das hidrelétricas

Ameaça associada:
Aumento das chuvas extremas

Riscos Altos no Longo Prazo (2081-2100)



Danos às infraestruturas da geração solar

Ameaça associada:
Aumento das chuvas extremas



Danos às infraestruturas da transmissão

Ameaças associadas:
Aumento de descargas atmosféricas e das condições favoráveis a incêndios.



Redução da eficiência da transmissão e geração solar

Ameaças associadas:
Aumento das temperaturas extremas e ondas de calor



Aumento da demanda de energia elétrica

Ameaça associada:
Aumento da temperatura média do ar

A avaliação contínua das **sinergias e da cumulatividade dos potenciais impactos** é essencial para o planejamento de medidas de adaptação e fortalecimento da resiliência.



Estratégias e Medidas para Fortalecimento da Resiliência

O horizonte: estratégias e medidas para a resiliência climática.

A partir da **avaliação dos riscos climáticos** identificados ao longo deste trabalho, são propostas **estratégias** - eixos estruturantes que orientam a adaptação e o fortalecimento da resiliência climática, e **medidas** - ações a serem implementadas para operacionalizar as estratégias.

Para além dos riscos identificados, a definição dessas propostas considera também a existência de **desafios que influenciam a capacidade de adaptação do setor**.

O conjunto de propostas evidencia a necessidade de **coordenação institucional, elemento central para promover maior resiliência do sistema frente às mudanças climáticas**.

Ressalta-se que, embora as recomendações desta seção não sejam necessariamente inéditas no setor elétrico e já existam **iniciativas em curso** relacionadas às **medidas** propostas, é fundamental fortalecê-las, ampliá-las e padronizá-las para promover **a resiliência climática em nível sistêmico**.

A resiliência envolve reconhecer desafios associados às características do sistema e às incertezas climáticas.

Compreender esse conjunto de fatores contribui para qualificar a análise e orientar a definição de estratégias e medidas.

▪ Incerteza climática

Projeções climáticas apresentam elevado grau de incerteza, decorrente das trajetórias de emissões de GEE e das limitações dos modelos climáticos em representar variáveis climáticas de interesse do setor.

▪ Complexidade do sistema elétrico

A interdependência entre geração, transmissão e demanda torna desafiadora a avaliação dos efeitos em cascata das mudanças climáticas e sua incorporação no planejamento.

▪ Incertezas na evolução do setor

A evolução do sistema elétrico ao longo do tempo envolve incertezas associadas a políticas públicas, marcos regulatórios, dinâmicas de mercado, condições socioeconômicas e transformações tecnológicas.

▪ Equilíbrio entre Resiliência e Investimentos

O fortalecimento da resiliência deve conciliar a segurança do abastecimento com a modicidade tarifária, exigindo avaliação dos custos e benefícios das medidas e adoção de investimentos inteligentes.

▪ Segurança Energética x Emissões

Fontes de geração fósseis contribuem para a segurança do suprimento, ao mesmo tempo que suas emissões intensificam as mudanças climáticas.

▪ Gestão da demanda e o papel do Consumidor

A gestão da demanda envolve desafios associados ao comportamento do consumidor e às mudanças nos padrões de consumo. Além disso, a ampliação do papel do consumidor como produtor de energia e a limitada capacidade de controle ampliam essa complexidade.

▪ Conflitos pelo uso da água

Situações de escassez hídrica intensificam os conflitos pelo uso da água entre os diversos usuários da água, podendo afetar a operação de usinas hidrelétricas e termelétricas.

▪ Lacunas e disponibilidade de dados

A disponibilidade, a padronização e o compartilhamento de dados climáticos e energéticos apresentam limitações, dificultando análises integradas e a tomada de decisão.

▪ Abastecimento dos Sistemas Isolados

Os sistemas isolados enfrentam desafios de qualidade do fornecimento de energia e alto custo, agravados por eventos climáticos extremos que podem afetar equipamentos e o transporte de combustíveis, implicando em necessidade de maior redundância local.

As estratégias orientam o fortalecimento da resiliência e agrupam diversas medidas...

Para orientar o **fortalecimento da resiliência climática do sistema elétrico brasileiro**, foram definidas **seis estratégias**, apresentadas a seguir. Essas estratégias foram concebidas de modo a atuar ao longo de toda a cadeia de impactos climáticos, abrangendo a antecipação e preparação, resposta a eventos adversos e recuperação. Nas páginas seguintes são **detalhadas as medidas** associadas a cada uma dessas estratégias.

FORTALECIMENTO DA INFRAESTRUTURA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

Fortalecer a resiliência dos ativos e das infraestruturas do sistema elétrico frente às mudanças climáticas, por meio de reforços, desenvolvimento de novas tecnologias e expansão do sistema com foco em adaptação.

INTEGRAÇÃO ENTRE PLANEJAMENTO E CIÊNCIA DO CLIMA

Incorporar de forma sistemática as mudanças climáticas aos processos de planejamento e à tomada de decisão do setor elétrico, promovendo a antecipação de riscos e a adaptação.

OPERAÇÃO RESILIENTE E CAPACIDADE DE RESPOSTA

Ampliar a capacidade do sistema elétrico de se adaptar a condições climáticas adversas e responder a eventos extremos, garantindo a continuidade do suprimento e a rápida recomposição da operação.

GESTÃO DA DEMANDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Promover o uso mais eficiente e flexível da energia, reduzindo a pressão sobre o sistema elétrico especialmente em condições climáticas adversas.

APRIMORAMENTO E GESTÃO DE DADOS

Aprimorar a base de dados climáticos e da relação clima-energia por meio do monitoramento, modelagem e compartilhamento de informações, apoiando a antecipação de riscos e as decisões do setor.

ARTICULAÇÃO INSTITUCIONAL E GOVERNANÇA

Fortalecer a governança e a articulação entre os diversos atores do setor elétrico e áreas correlatas, promovendo coordenação, agilidade na tomada de decisão e atuação integrada em contextos de normalidade e de crise.

...que envolvem fortalecimento, inovação e planejamento...

FORTALECIMENTO DA INFRAESTRUTURA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

Fortalecer a resiliência dos ativos e das infraestruturas do sistema elétrico frente às mudanças climáticas, por meio de reforços, desenvolvimento de novas tecnologias e expansão do sistema com foco em adaptação.

Reforçar e adaptar ativos

- **Reforçar infraestruturas e adotar equipamentos e materiais mais resistentes**, inclusive ampliando redundâncias, considerando condições climáticas futuras.

Novas Tecnologias

- **Fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais voltados à resiliência climática**, ampliando a capacidade de adaptação do sistema elétrico.

Configuração do Sistema

- **Ampliar a flexibilidade e a capacidade de armazenamento de energia**, contribuindo para a segurança do suprimento e a mitigação dos efeitos da variabilidade climática.
- **Promover a diversificação e a complementaridade da matriz elétrica**, com base nas potencialidades do país e nas diferentes disponibilidades sazonais e regionais dos recursos energéticos.
- **Ampliar e reforçar a rede de transmissão**, visando a continuidade do fornecimento de energia elétrica diante de impactos do clima.

INTEGRAÇÃO ENTRE PLANEJAMENTO E CIÊNCIA DO CLIMA

Incorporar de forma sistemática as mudanças climáticas aos processos de planejamento e à tomada de decisão do setor elétrico, promovendo a antecipação de riscos e a adaptação.

Planejamento Preventivo

- **Promover o uso da melhor ciência disponível sobre mudança do clima nos estudos de planejamento do sistema elétrico**, considerando impactos sobre geração, transmissão e demanda e identificando soluções que maximizem as sinergias entre adaptação e mitigação das mudanças do clima.
- **Considerar riscos climáticos na localização e no dimensionamento de novos empreendimentos**, antecipando impactos e orientando decisões de investimento.
- **Reavaliar as premissas e critérios de planejamento do sistema elétrico**, à luz das mudanças no clima e de seus impactos.
- **Desenvolver e adotar metodologias e orientações para avaliação da resiliência climática de ativos**.

...operação resiliente e eficiência energética...

OPERAÇÃO RESILIENTE E CAPACIDADE DE RESPOSTA

Fortalecer a capacidade do sistema elétrico de se adaptar a condições climáticas adversas e responder a eventos extremos, garantindo a continuidade do suprimento e a rápida recomposição da operação.

Operação Resiliente do Sistema

- Adotar estratégias preventivas de operação orientadas à redução de riscos climáticos, utilizando informações climáticas em sistemas de tempo real para antecipar impactos.

Resposta e Recuperação em Eventos Extremos

- Estruturar planos e protocolos de resposta a emergências, com procedimentos específicos para diferentes tipos de eventos extremos e mecanismos de coordenação entre agentes.
- Fortalecer a capacidade de resposta operacional em situações críticas, com mobilização e compartilhamento de equipes especializadas, uso de recursos móveis e atuação emergencial para manutenção do serviço e suprimento.
- Reforçar a capacidade de recomposição e recuperação do sistema elétrico, incluindo inspeção, reparo e restabelecimento de ativos pós-evento, com melhoria contínua dos planos de ação e resposta à crise através da sistematização de aprendizados.

GESTÃO DA DEMANDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Promover o uso mais eficiente e flexível da energia, reduzindo a pressão sobre o sistema elétrico especialmente em condições climáticas adversas.

Gestão da Demanda

- Ampliar mecanismos de resposta da demanda e de sinalização econômica, incluindo programas estruturados para redução ou deslocamento de carga em períodos críticos, bem como mecanismos tarifários que reflitam as condições operativas e os custos do sistema (ex.: horários de ponta, escassez).
- Expandir a integração consumidor-sistema, por meio de redes inteligentes e de infraestrutura de medição avançada (*smart grids* e *smart meters*).

Eficiência Energética

- Aumentar a eficiência energética no consumo final e no desempenho da infraestrutura elétrica, estimulando a modernização tecnológica e adoção de equipamentos, construções e processos mais eficientes.
- Reduzir perdas técnicas e comerciais no sistema elétrico, por meio do aprimoramento de sistemas de medição e da redução de ineficiências operacionais.
- Promover o uso racional da energia, incentivando comportamentos de consumo mais conscientes.

...gestão de dados e governança.

APRIMORAMENTO E GESTÃO DE DADOS

Aprimorar a base de dados climáticos e da relação clima-energia por meio do monitoramento, modelagem e compartilhamento de informações, apoiando a antecipação de riscos e as decisões do setor.

Aprimoramento e gestão de dados

- **Aprimorar o monitoramento e a disponibilidade de dados sobre condições climáticas**, por meio da expansão das redes de medição e do uso de novas tecnologias.
- **Aprimorar a modelagem climática e energética**, de forma a representar o contexto brasileiro e ampliar a compreensão das relações entre clima e energia, incluindo estudos sobre hábitos de consumo e posse de equipamentos.
- **Sistematizar, integrar e promover o compartilhamento de dados climáticos e energéticos**, garantindo transparência, interoperabilidade e uso das informações pelos agentes do setor.

ARTICULAÇÃO INSTITUCIONAL E GOVERNANÇA

Fortalecer a governança e a articulação entre os diversos atores do setor elétrico e áreas correlatas, promovendo coordenação, agilidade na tomada de decisão e atuação integrada em contextos de normalidade e de crise.

Articulação institucional e governança

- **Fortalecer a coordenação entre agentes do setor elétrico e instituições correlatas** (ex.: recursos hídricos, meteorologia, defesa civil), promovendo atuação integrada frente a riscos climáticos.
- **Aprimorar instâncias e protocolos de coordenação para resposta a eventos extremos**, definindo papéis, responsabilidades e fluxos de informação entre instituições.
- **Promover o compartilhamento de informações estratégicas entre agentes**, assegurando consistência e transparência na gestão de riscos e na tomada de decisão.

Grande parte das medidas apresentadas possui caráter executivo e operacional. Já as medidas da estratégia **Articulação Institucional e Governança** são de **natureza transversal**, de forma a unir as outras cinco estratégias e potencializar a efetividade das medidas.

As medidas buscam minimizar ou evitar riscos sistêmicos...

Uma forma sintética de apresentar a relevância das medidas para o fortalecimento da resiliência é através da **Matriz Risco x Adaptação** para o Sistema Elétrico Brasileiro. Esta matriz demonstra **como cada medida se relaciona com os riscos identificados**, se de forma direta ou indireta.

A estratégia **Articulação Institucional e Governança** foi **representada de forma transversal**, reforçando seu papel integrador.

A estratégia **Aprimoramento e Gestão de Dados**, apesar de ter relação indireta com os riscos, **dialoga e subsidia todas as medidas**, sendo essencial para apoiar as decisões do setor.

— Pouca ou nenhuma relação entre a medida de adaptação e o risco

● Relação indireta entre a medida de adaptação e o risco

● Relação direta entre a medida de adaptação e o risco

			 Redução da Disponibilidade de Recursos para a Geração	 Redução da Eficiência na Geração ou Transmissão	 Danos às Infraestruturas	 Aumento da demanda por Energia Elétrica
Articulação Institucional e Governança	Fortalecimento da Infraestrutura e Inovação Tecnológica	Reforçar infraestruturas e adotar equipamentos e materiais mais resistentes	●	●	●	●
		Fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais voltados à resiliência climática	●	●	●	●
		Ampliar a flexibilidade e a capacidade de armazenamento de energia	●	●	●	●
		Promover a diversificação e a complementaridade da matriz elétrica	●	●	●	●
		Ampliar e reforçar a rede de transmissão	●	●	●	●
	Integração entre Planejamento e Ciência do Clima	Promover o uso da melhor ciência disponível sobre mudança do clima nos estudos de planejamento	●	●	●	●
		Considerar riscos climáticos na localização e no dimensionamento de novos empreendimentos	●	●	●	●
		Reavaliar as premissas e critérios de planejamento do sistema elétrico	●	●	●	●
		Desenvolver e adotar metodologias e orientações para avaliação da resiliência climática de ativos	—	●	●	—
	Operação Resiliente e Capacidade de Resposta	Adotar estratégias preventivas de operação orientadas à redução de riscos climáticos	●	●	●	●
		Estruturar planos e protocolos de resposta a emergências	●	●	●	●
		Fortalecer a capacidade de resposta operacional em situações críticas	●	●	●	—
		Reforçar a capacidade de recomposição e recuperação do sistema elétrico	●	●	●	—
	Gestão da demanda e eficiência energética	Ampliar mecanismos de resposta da demanda e de sinalização econômica	●	—	—	●
		Expandir a integração consumidor-sistema	●	—	—	●
		Aumentar a eficiência energética no consumo final e no desempenho da infraestrutura elétrica	●	●	—	●
		Reduzir perdas técnicas e comerciais no sistema elétrico	●	●	—	●
		Promover o uso racional da energia	●	—	—	●
	Aprimoramento e Gestão de Dados	Aprimorar o monitoramento e a disponibilidade de dados sobre condições climáticas	●	—	●	●
		Aprimorar modelagem climática e energética	●	—	●	●
		Sistematizar, integrar e promover o compartilhamento de dados climáticos e energéticos	●	—	●	●

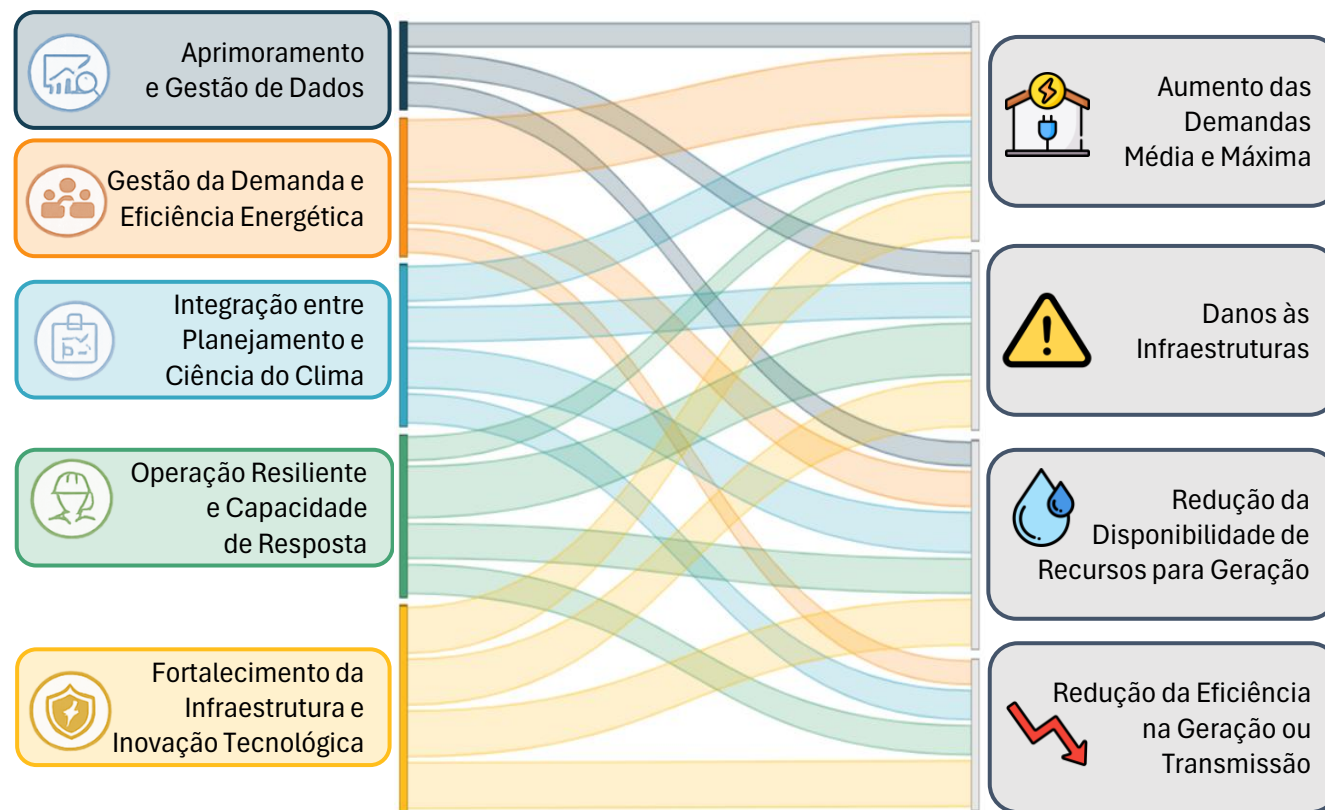
... e as estratégias são complementares.

Embora todas as medidas para o fortalecimento da resiliência tenham sido elaboradas com o objetivo de reduzir ou evitar os riscos sistêmicos ocasionados pelas mudanças climáticas, é notório que algumas estratégias são mais direcionadas para alguns riscos do que outras.

Por exemplo, a estratégia **Operação Resiliente e Capacidade de Resposta** traz medidas mais ligadas ao risco **Danos às Infraestruturas**. Já a estratégia **Gestão da Demanda e Eficiência Energética** é bastante focada em minimizar o risco **Aumento da demanda de energia média e máxima**. Por sua vez, a estratégia **Fortalecimento da Infraestrutura e Inovação Tecnológica** tem caráter transversal, trazendo medidas relacionadas a mitigação dos quatro riscos. As medidas da estratégia **Integração entre Planejamento e Ciência do Clima** são mais concentradas na redução do risco sistêmico **Redução da Disponibilidade de Recursos para a Geração**.

As medidas podem minimizar mais de um risco, e também podem gerar efeitos sinérgicos na redução de outros riscos. Por exemplo, a estratégia **Aprimoramento e Gestão de Dados** reúne medidas que trazem benefícios indiretos para o sistema como um todo.

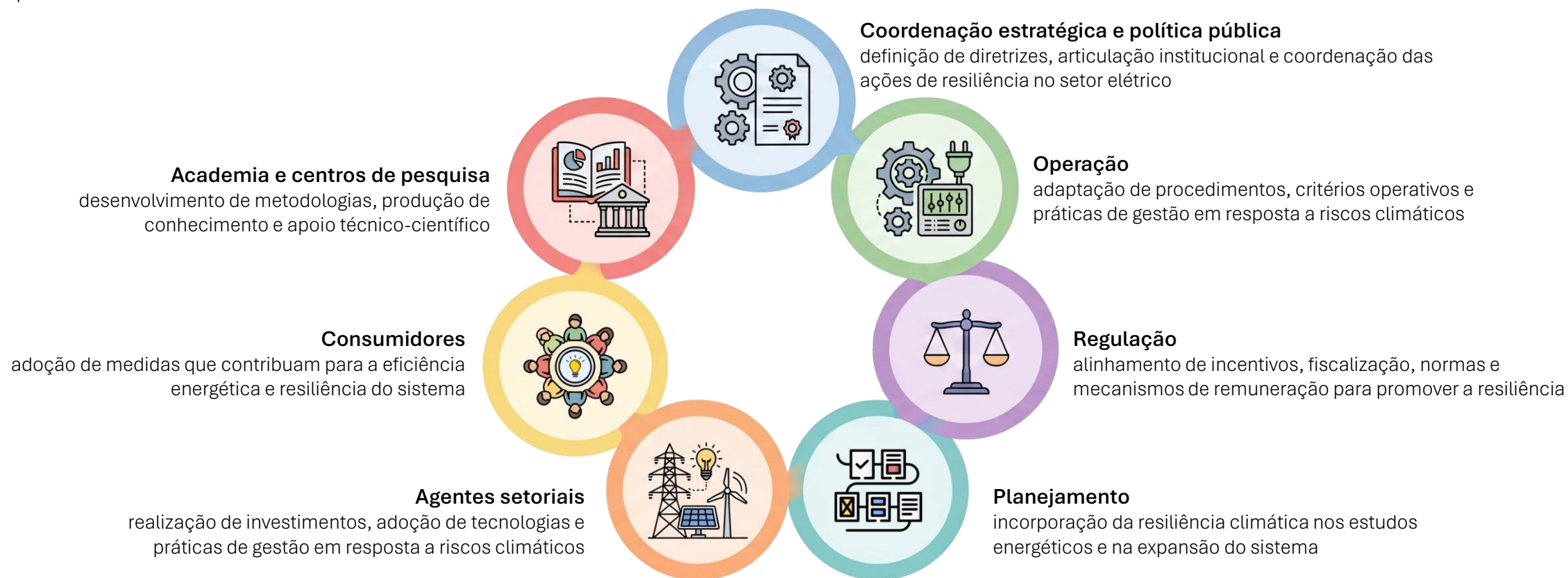
Por fim, a estratégia **Articulação Institucional e Governança** permeia todas as estratégias e medidas. Ela é fundamental para a coordenação e a integração das estratégias e dos atores responsáveis, potencializando sinergias e aumentando a efetividade das medidas.



Cada risco sistêmico pode demandar múltiplas estratégias de adaptação, evidenciando que a resiliência climática do setor elétrico depende de uma abordagem integrada e multissetorial.

O sucesso das estratégias de adaptação depende da coordenação entre diversos atores...

O fortalecimento da resiliência climática do sistema elétrico brasileiro **requer atuação conjunta e integrada** de diferentes atores, com responsabilidades distintas e papéis complementares.



...e da sinergia entre os diferentes instrumentos e planos.

O alinhamento e a articulação entre os diferentes instrumentos e planos é ponto fundamental para garantir a efetividade das propostas.

Neste contexto, podemos destacar o **Plano Clima (Adaptação)** – Plano Setorial de Energia, o Plante – **Plano Nacional de Transição Energética**, o PNE – **Plano Nacional de Energia**, o PDE – **Plano Decenal de Energia** e o PRR – **Plano de Recuperação do Reservatório de Regularização de Usinas Hidrelétricas do País**.

Esses planos já incorporam, em diferentes níveis, diretrizes e ações relacionadas à adaptação e à gestão de riscos climáticos, e desempenham **papéis complementares na orientação do setor**.

Assim, as **estratégias e medidas propostas** neste *Roadmap* foram construídas alinhando esses instrumentos, **potencializando sinergias** e contribuindo para uma abordagem integrada e coordenada frente aos impactos das mudanças climáticas.





Considerações Finais

A sistematização das informações permitiu construir uma base analítica aplicada ao contexto brasileiro.

Essa base analítica possibilitou compreender como as mudanças climáticas se manifestam no Brasil e seus efeitos sobre o sistema elétrico brasileiro. Dentre as informações utilizadas neste trabalho estão:

- **Tendências climáticas para o Brasil**
- **Cenários de mudança do clima**
- **Ameaças climáticas**
- **Exposição dos ativos e da população**
- **Vulnerabilidade do sistema elétrico**
- **Riscos climáticos**
- **Estratégias para a resiliência climática**

A análise da evolução do sistema elétrico brasileiro evidenciou que, ao longo das últimas décadas, crises como o racionamento de 2001, as secas prolongadas e a escassez hídrica de 2021 impulsionaram reformas institucionais, expansão da transmissão, diversificação da matriz elétrica e aprimoramento do planejamento setorial. Esse processo resultou em um sistema mais integrado, flexível e capaz de responder a eventos climáticos extremos. Conhecer essas lições permite identificar vulnerabilidades, orientar decisões futuras e acelerar medidas que reforcem a segurança energética em um cenário climático cada vez mais desafiador.



A resiliência climática é determinante para garantir a segurança do sistema elétrico em um clima cada vez mais incerto.

As mudanças climáticas afetam todos os segmentos do sistema elétrico, da geração e transmissão ao consumo final...



Geração Hidrelétrica

A redução das chuvas e o aumento da frequência de secas tendem a diminuir a disponibilidade hídrica e tornar a geração **mais variável**. Dada sua elevada participação na matriz, esses impactos podem comprometer a segurança do suprimento e ampliar a necessidade de fontes complementares. Além disso, chuvas extremas impõem maior risco às infraestruturas.



Geração Eólica

Os recursos para geração eólica não devem ser alterados de forma significativa, no entanto, **ventos severos e descargas atmosféricas podem afetar a infraestrutura** de geração. Em geral, os impactos tendem a ser locais e absorvíveis pelo sistema interligado.



Geração Solar

O aumento das temperaturas e de ondas de calor tendem a **reduzir a eficiência da geração solar, podendo neutralizar eventuais ganhos decorrentes do aumento na irradiação**. Além disso, **eventos extremos podem afetar a infraestrutura**, embora, em geral, os impactos sejam absorvíveis pelo sistema.



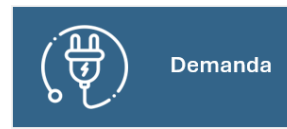
Transmissão

Distribuídas pelo país, as linhas de transmissão estão expostas a diversas ameaças climáticas. **Ventos severos, chuvas intensas, descargas atmosféricas e queimadas podem causar danos e interrupções**, e **altas temperaturas podem reduzir a eficiência**. Por sua função estruturante, falhas no segmento **podem se propagar** e afetar todo o sistema.



Geração Térmica

O aumento das temperaturas tende a **reduzir a eficiência**, enquanto **restrições hídricas podem limitar a operação de termelétricas**, além de **afetar a disponibilidade de combustíveis**. Ainda assim, sua flexibilidade as torna essenciais para garantir o suprimento em situações críticas.



Demanda

O aumento da temperatura média e da ocorrência e duração de ondas de calor tendem a **eleva o consumo e intensificar os picos de demanda por energia**. Em geral, esses efeitos pressionam o sistema elétrico, ampliando a complexidade operativa e exigindo maior capacidade de resposta para garantir o atendimento.

...sendo a exposição e a vulnerabilidade diferentes para cada subsistema.

Subsistema Norte

Subsistema mais exposto à **redução de chuvas e ao aumento de secas**, o que afeta a geração hidrelétrica média anual. A predominância de usinas a fio d'água com baixa capacidade de armazenamento aumenta a **vulnerabilidade tanto a secas severas quanto a cheias extremas**. Para termelétricas e sistemas isolados, o **principal risco é logístico**: secas mais frequentes e duradouras reduzem a navegabilidade dos rios e dificultam o abastecimento. **A grande extensão territorial e a rede de transmissão predominantemente radial** aumentam a vulnerabilidade do sistema.

Subsistema Sul

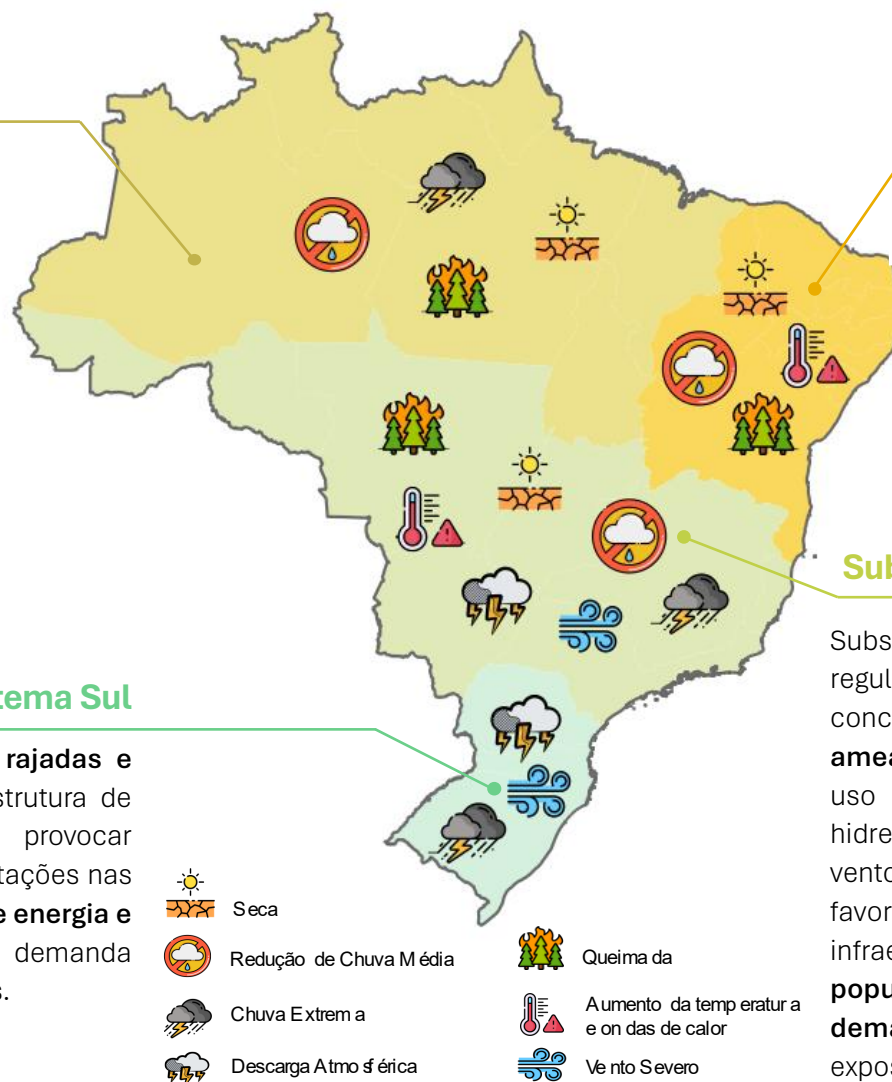
Subsistema mais exposto a **ventos severos, rajadas e chuvas intensas**, que podem afetar a infraestrutura de transmissão e usinas hidrelétricas, provocar desligamentos de turbinas eólicas e exigir adaptações nas instalações. Além disso, o **elevado consumo de energia e a alta amplitude térmica** da região tornam a demanda sensível ao aumento das temperaturas extremas.

Subsistema Nordeste

Subsistema com grande exposição ao **aumento de secas e à diminuição da precipitação anual**, pressionando reservatórios e ampliando os conflitos pelo uso da água. Por conta de ventos constantes e altos índices de irradiação, concentra a geração eólica e solar centralizada do País. **Todavia, o aumento da temperatura, a intensificação das secas e as condições favoráveis a incêndios** podem reduzir a eficiência e a produção dos sistemas fotovoltaicos, neutralizando eventuais efeitos positivos do aumento na irradiação.

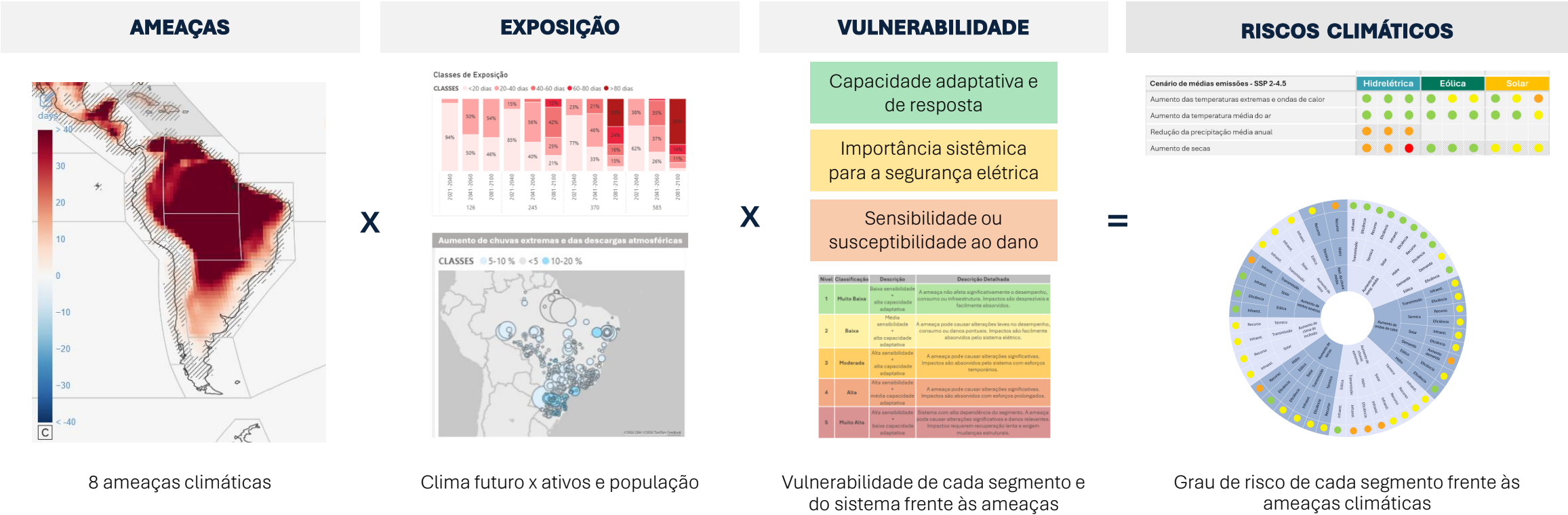
Subsistema Sudeste/Centro-Oeste

Subsistema com as principais hidrelétricas com reservatórios de regularização e a maior densidade da rede de transmissão. Também concentra a geração solar (MMGD) e termelétricas. **A principal ameaça é o aumento de secas**, que podem ampliar os conflitos pelo uso da água e afetar a disponibilidade de recursos para geração hidrelétrica e termelétrica a biomassa. Além disso, a exposição a ventos severos, chuvas extremas, descargas atmosféricas e condições favoráveis a incêndio podem danificar instalações solares e infraestruturas de transmissão. A **elevada concentração populacional** torna o subsistema **mais suscetível a picos de demanda durante ondas de calor**, principalmente no interior, onde a exposição ao aumento de temperatura é maior.



A avaliação dos riscos resulta da combinação entre ameaças, exposição e vulnerabilidade...

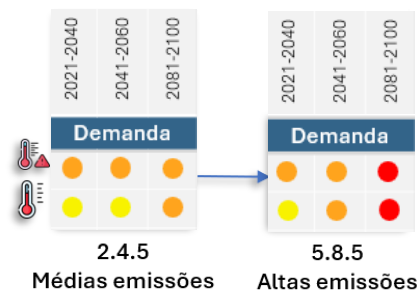
Com base no conhecimento acumulado foi desenvolvida metodologia qualiquantitativa para avaliar e classificar os riscos climáticos considerando diferentes cenários climáticos.



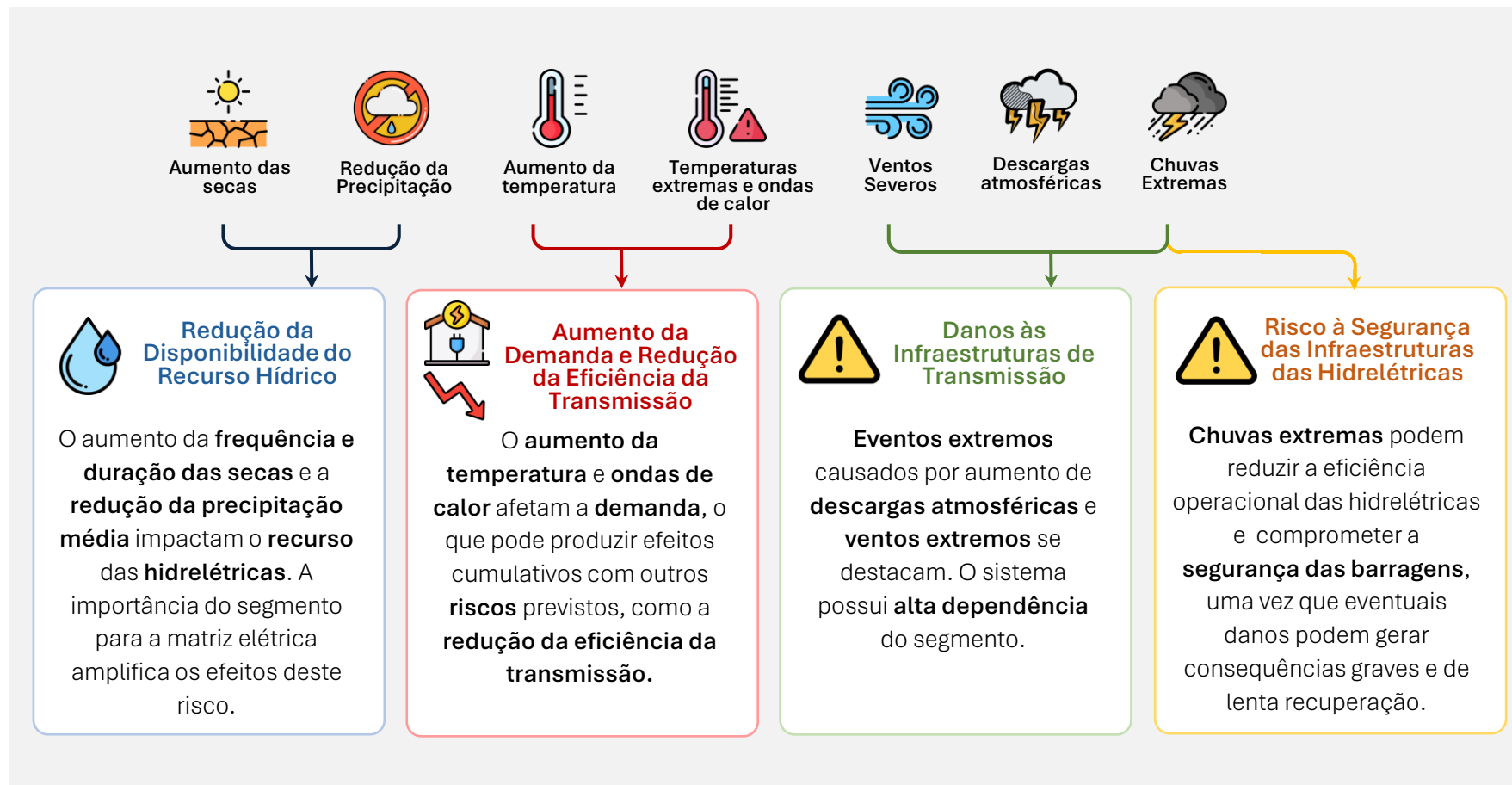
...permitindo a visão sistêmica dos riscos climáticos.

Aplicando a metodologia desenvolvida para a **avaliação de riscos climáticos**, foi possível observar que:

Alguns riscos climáticos se mostraram mais relevantes, por apresentarem níveis elevados no curto prazo, mesmo em cenários de médias emissões, e se intensificam significativamente no longo prazo e em cenários de altas emissões.

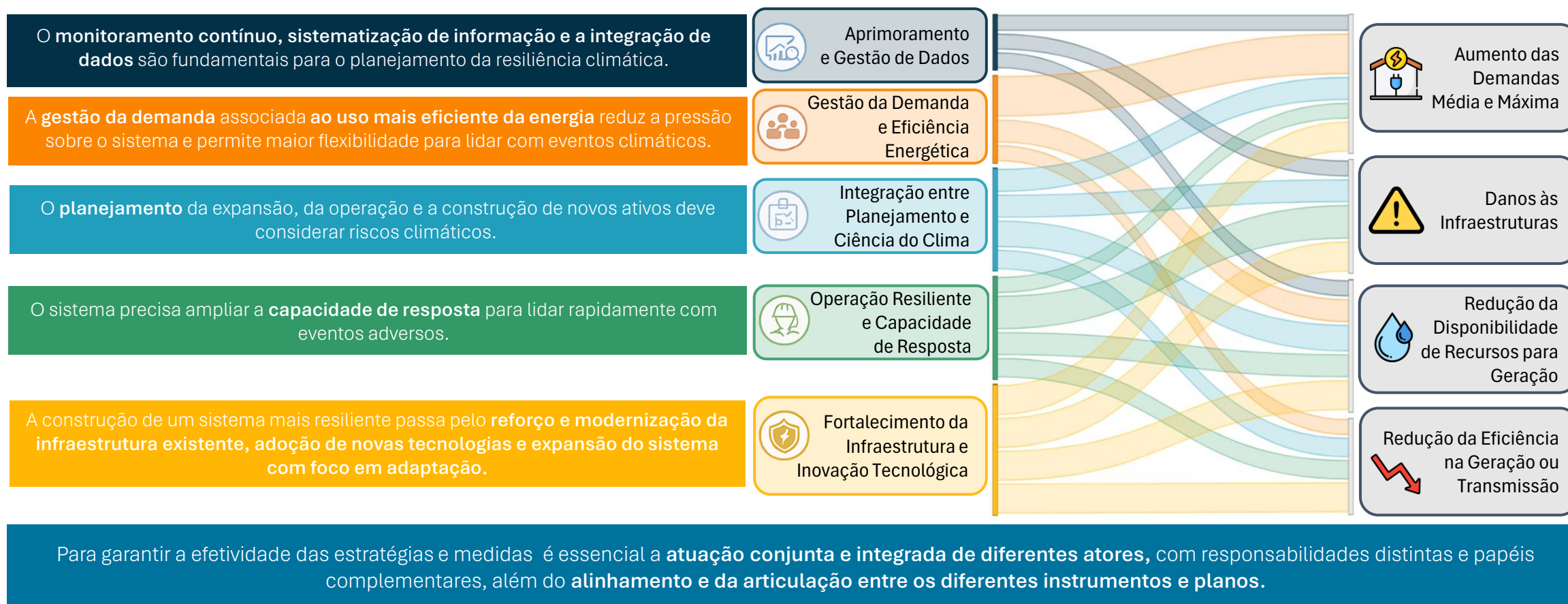


Os segmentos que chegaram às maiores pontuações de risco acumulado foram a **Transmissão**, a **Geração Hidrelétrica**, e a **Demanda**.



Estratégias e medidas foram propostas para minimizar os riscos sistêmicos...

Para orientar o fortalecimento da resiliência climática do sistema elétrico brasileiro, foram definidas estratégias e medidas, abrangendo toda a cadeia de impactos climáticos: antecipação, preparação, resposta e recuperação a eventos adversos.



...mas o sucesso de implementação depende de articulação institucional e reconhecimento dos desafios que influenciam a capacidade de adaptação.

Incorporar riscos climáticos ao planejamento envolve:



Reconhecer a **natureza incerta e dinâmica do sistema climático** e a **complexidade do sistema elétrico** brasileiro, agregando mais incerteza às trajetórias energéticas futuras



Equilibrar os investimentos para **resiliência climática com a modicidade tarifária** e segurança energética



Incentivar a criação e disponibilização de **bases de dados climáticos e energéticos integradas**, para auxiliar nas tomadas de decisão



Construir **decisões robustas e ao mesmo tempo flexíveis** no longo prazo.

O fortalecimento da resiliência climática do sistema elétrico brasileiro **requer avaliação contínua dos riscos climáticos e reconhecimento de desafios complexos**, como incertezas climáticas, interdependências sistêmicas e dilemas entre segurança energética e sustentabilidade, **visando orientar estratégias e investimentos inteligentes.**

A resiliência é um processo contínuo de aprendizado e transformação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2026. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2026**: Ano-base 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> . Acesso em: 03 jun. 2026.

EPRI – Electric Power Research Institute. 2023. **Climate-Informed Planning and Adaptation for Power Sector Resilience**. Disponível em: <https://www.epri.com/research/products/000000003002026317> Acesso em: 03 jun. 2026.

IEA – International Energy Agency. 2022. **Climate Resilience for Energy Security**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security> Acesso em: 03 jun. 2026.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. **Interactive Atlas – Climate Change 2021** – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/> . Acesso em: 15 ago. 2025

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. **Climate Change 2022** – Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf e https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf (versão em português). Acesso em: 03 jun. 2026.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit e EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2025. **Resumo Executivo - Impactos das Mudanças Climáticas no Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-914/sumario-executivo-mudancas-climaticas-cores-epe-02_v0411.pdf Acesso em: 23 de junho de 2026.

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e CC/PR – Casa Civil da Presidência da República. 2025. **Plano Clima Adaptação – Sumário Executivo**. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/mudanca-do-clima/plano-clima-adaptacao-sumario-executivo.pdf>. Acesso em: 29 de junho de 2026.

TCFD - Task Force on Climate-related Financial Disclosures. 2017. **Final Report - Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures**. Disponível em: <https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf> Acesso em: 03 jun. 2026.

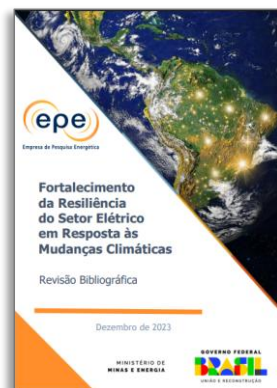
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WBG – The World Bank Group. 2025. **Climate Risk Profile: Brazil**. Disponível em: https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/17303-WB_Brazil%20Country%20Profile-WEB.pdf. Acesso em: 03 jun. 2026.

A elaboração desse documento contou com o auxílio de ferramentas de inteligência artificial: Microsoft 365 Copilot; Chat GPT; Google Gemini; NotebookLM; e Perplexity AI. Todos os textos e informações foram avaliados, verificados, revisados e validados pela equipe técnica da EPE.

Foram utilizados imagens, ícones e figuras disponíveis nas páginas [Flaticon](#), [Magnific](#) e [Pexels](#).

Outras Publicações da série “Roadmap para o Fortalecimento da Resiliência do Setor Elétrico Brasileiro em Resposta às Mudanças Climáticas”:



Nota Técnica de
Revisão
Bibliográfica



Factsheet
Hidroeletricidade e
Mudanças
Climáticas



Factsheet
Transmissão e
Mudanças
Climáticas



Factsheet
Geração Eólica e
Mudanças
Climáticas



Factsheet
Geração Solar e
Mudanças
Climáticas



Factsheet Geração
Termelétrica e
Mudanças
Climáticas



Factsheet
Demanda e
Mudanças
Climáticas