

HIDRELETRICIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

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

Compreender as relações entre as mudanças climáticas e a geração hidrelétrica é fundamental para subsidiar o planejamento da expansão com foco no aumento da resiliência do sistema elétrico brasileiro. Esse Fact Sheet aborda o papel da hidreletricidade no Brasil, apresenta os riscos climáticos, como a EPE vem tratando esse tema e aponta caminhos para a adaptação do sistema elétrico frente às mudanças climáticas.

1 Entendendo o contexto

A energia hidrelétrica tem sido historicamente a principal fonte de energia elétrica no Brasil.

UHE + PCH + CGH
425.966 GWh

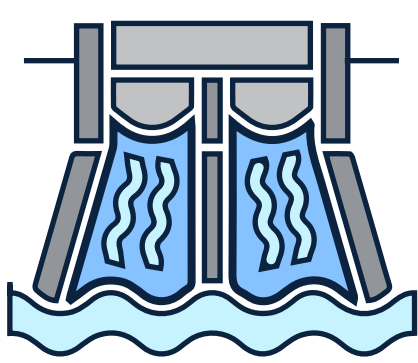


60,2%

DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA EM 2023

Balanco Energético Nacional
BEN 2024 | Ano base 2023 (EPE, 2024)

2 Identificando os Riscos Climáticos



Para além da energia gerada, **as hidrelétricas oferecem serviços essenciais** para o bom funcionamento do **Sistema Interligado Nacional (SIN)** como:

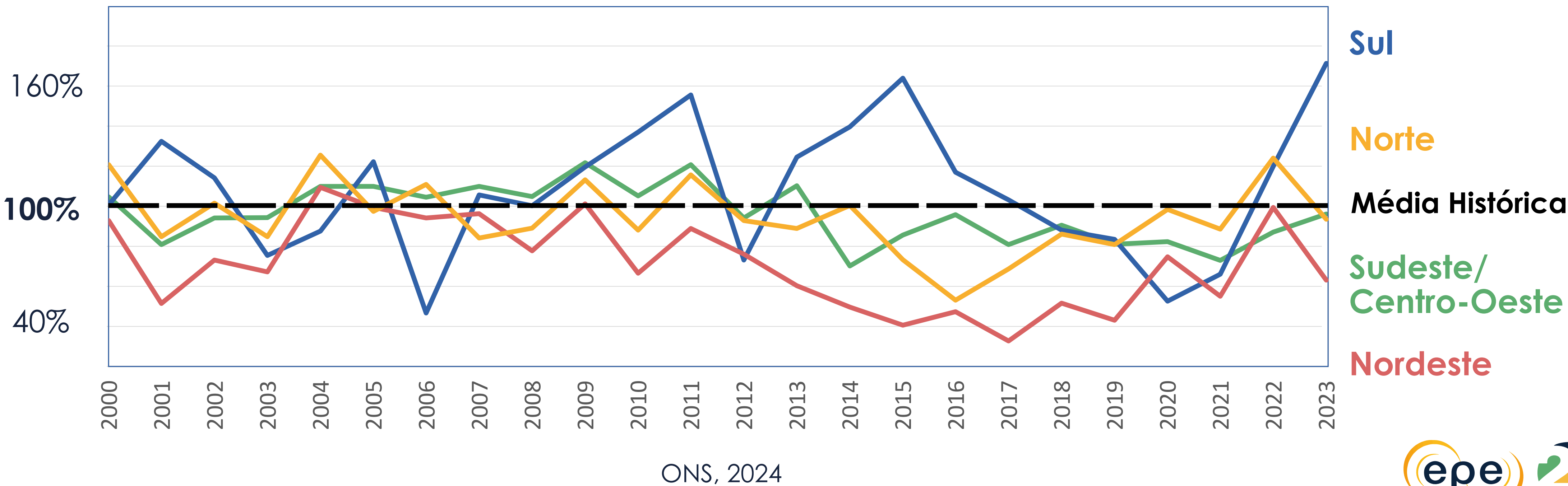
- ✦ **Armazenamento de energia**, por meio dos reservatórios e da regularização das vazões afluentes, permitindo que produzam eletricidade de forma constante durante todo o ano, mesmo em períodos de baixa pluviosidade;
- ✦ **Flexibilidade operacional para atender as flutuações da carga**, sendo despachadas em horários de ponta ou quando ocorre redução da geração de outras fontes variáveis, em especial a solar;



A geração hidrelétrica é fortemente influenciada pela **variação natural do regime hidrológico**, ou seja, períodos de seca ou chuvas afetam diretamente a geração das usinas. No gráfico de ENA é possível observar a variação das vazões ao longo dos últimos anos e os períodos com vazões acima ou abaixo da média do período histórico.

Variação Anual da Energia Natural Afluyente (ENA), em % da média histórica

A ENA representa as vazões afluentes às usinas hidrelétricas transformadas em unidades de energia elétrica.



O QUE VEM ACONTECENDO ?

Eventos recentes indicam possíveis impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica

2014

Vazões afluentes às hidrelétricas muito abaixo da média nos subsistemas¹ Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste em decorrência da **seca**. Armazenamento do SIN atingiu o nível mais baixo do histórico.

Na região Norte, **chuvas excepcionalmente acima da média** resultaram na cheia histórica do rio Madeira, **provocando a interrupção da geração na UHE Santo Antônio**.

2020 - 2021

Devido à **seca prolongada e vazões afluentes às hidrelétricas abaixo das médias históricas**, os níveis armazenamento do SIN estavam extremamente baixos. **Diversas medidas foram adotadas para manter a continuidade do abastecimento de energia elétrica**.

Na ocasião MME e EPE publicaram a cartilha **Escassez hídrica e o fornecimento de energia elétrica no Brasil**.

¹ O Sistema Interligado Nacional é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, interconectados por linhas de transmissão, propiciando a transferência de energia entre eles.

2012

Início de **longo período de seca** em que por diversos anos consecutivos foram registrados volumes de chuva e vazões dos rios abaixo da média histórica em diversas partes do Brasil, sobretudo no Nordeste.

2017

Armazenamento do SIN atingiu o 2º nível mais baixo do histórico, em função da **seca desde 2012**. Reservatórios da UHE Serra da Mesa (GO) e da UHE Furnas (SP) atingiram os níveis mais baixos do histórico.

2023 - 2024

Em função da **seca extrema** e das **baixas vazões nos rios amazônicos** ocorreu a paralisação da UHE Santo Antônio (RO) e as UHEs Ferreira Gomes e Cachoeira Caldeirão (AP) operaram de forma intermitente.

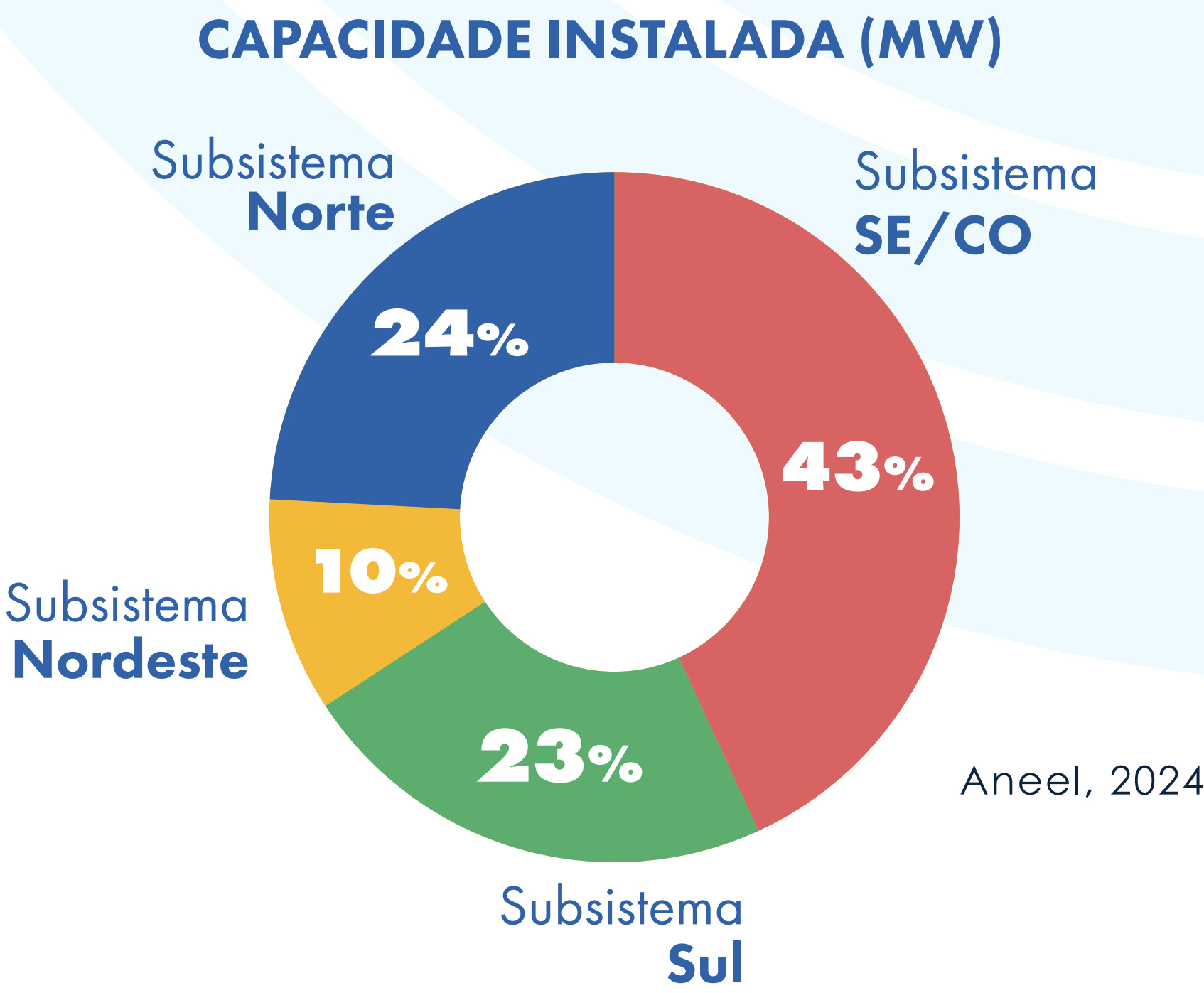
Chuvas intensas na região Sul deixaram em **situação de risco diversas infraestruturas de geração e transmissão de energia elétrica**.

Rompimento parcial das barragens da UHE 14 de Julho e da PCH Salto Forqueta. Outras 7 usinas ficaram em situação de risco.

ONDE ESTÃO AS HIDRELÉTRICAS NO BRASIL?



Há usinas hidrelétricas em **todas as regiões do Brasil**, em locais com características hidrológicas e geográficas distintas. **O subsistema Sudeste/Centro-Oeste concentra a maior capacidade instalada de UHEs, seguido do Norte, Sul e Nordeste.**

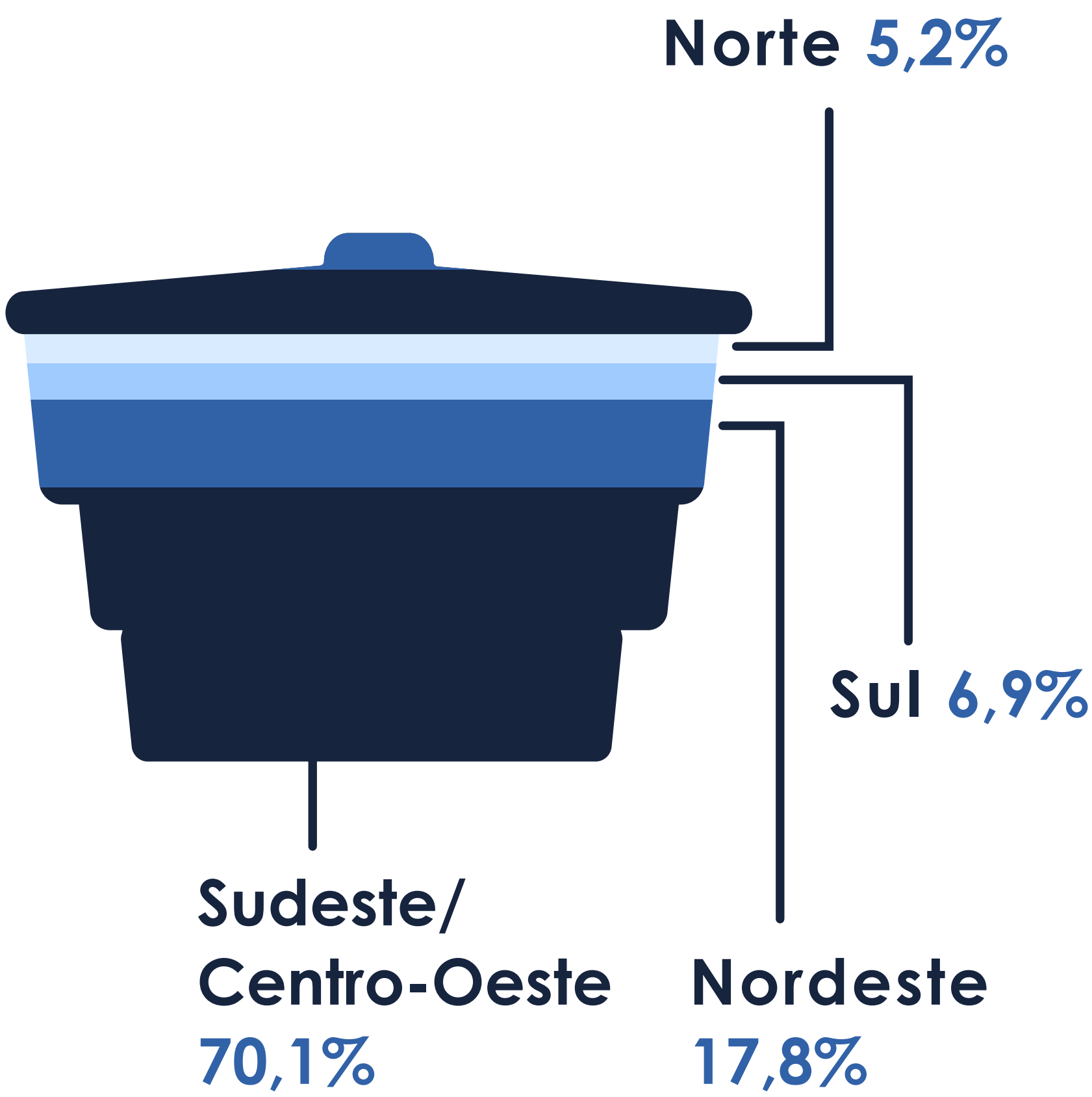


Devido à grande extensão territorial do país e à variedade climática, as bacias hidrográficas brasileiras estão sujeitas a diferentes condições hidrológicas. Essa **diversidade hidrológica permite uma complementaridade sazonal entre as regiões**. Assim, quando algumas bacias apresentam baixa disponibilidade hídrica, outras podem compensar a geração, favorecendo a segurança e resiliência no fornecimento de energia elétrica no país.

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os principais reservatórios de regularização estão no **subsistema Sudeste/Centro-Oeste**, que concentra 70% da capacidade de armazenamento do País. Destacam-se os reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Paraná, e seus afluentes Paranaíba, Grande, Tietê e Paranapanema. O subsistema Nordeste concentra quase 20 % da capacidade de armazenamento do Brasil, com destaque para a bacia do rio São Francisco.

No Norte, as usinas hidrelétricas, em geral, possuem baixas quedas d'água e grandes vazões afluentes, **operando a fio d'água**, sem grande capacidade de armazenamento.



ONS, 2024

IDENTIFICANDO RISCOS CLIMÁTICOS



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

Para avaliar os **riscos climáticos** associados às hidrelétricas, é preciso estudar o comportamento das **ameaças** que têm maior relação com a **geração hidrelétrica**, onde as **usinas** estão **localizadas** e quais são as suas **vulnerabilidades**.

QUAIS AS PRINCIPAIS AMEAÇAS CLIMÁTICAS RELACIONADAS À GERAÇÃO HIDRELÉTRICA E QUAIS OS POSSÍVEIS IMPACTOS SOBRE ESSA FONTE?

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**.



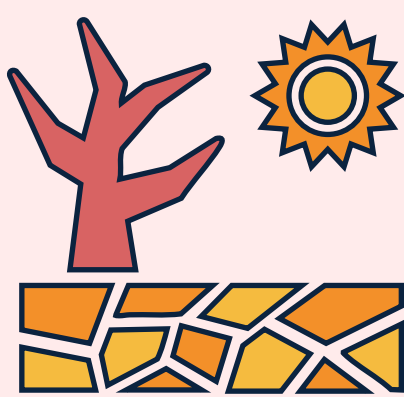
Redução da chuva média anual

- ♦ Redução da disponibilidade hídrica e da geração hidrelétrica média
- ♦ Redução dos níveis dos reservatórios de armazenamento e eficiência das UHEs



Aumento da chuva média anual

- ♦ Aumento da disponibilidade hídrica e possibilidade de ampliação da geração hidrelétrica média
- ♦ Aumento do carreamento de sedimentos e assoreamento dos reservatórios



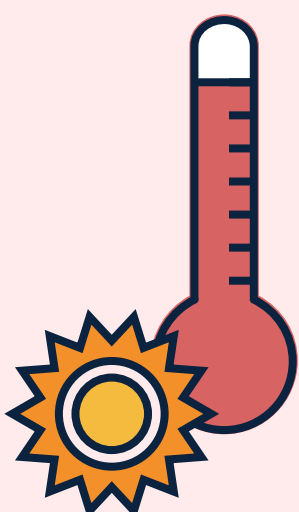
Aumento da frequência e duração das secas

- ♦ Redução da geração hidrelétrica em UHEs a fio d'água
- ♦ Necessidade de maior capacidade de armazenamento e gestão dos reservatórios
- ♦ Aumento dos usos da água e restrições operativas



Aumento da magnitude e duração das chuvas extremas

- ♦ Limitação de nível de água para controle de cheias
- ♦ Ocorrência de vazões superiores às de referência dos projetos
- ♦ Aumento do carreamento de sedimentos e assoreamento dos reservatórios
- ♦ Perda de queda pela elevação dos níveis d'água a jusante

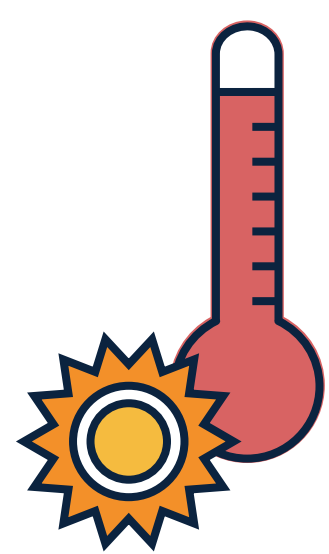


Aumento da temperatura

- ♦ Aumento da evaporação dos reservatórios e redução da disponibilidade hídrica
- ♦ Redução da eficiência dos equipamentos

QUAIS SÃO AS TENDÊNCIAS PARA O CLIMA NO BRASIL?

Os resultados **das projeções climáticas realizadas pelo IPCC** e refinadas no âmbito do Plano Clima – Adaptação apontam para as seguintes tendências:



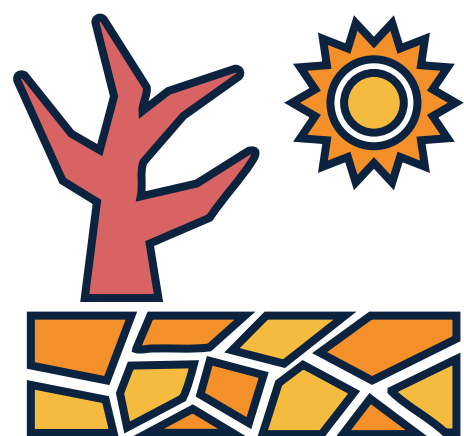
Aumento da temperatura média em todas as regiões
(alta confiança)



Redução da chuva anual na região Norte
(média confiança)



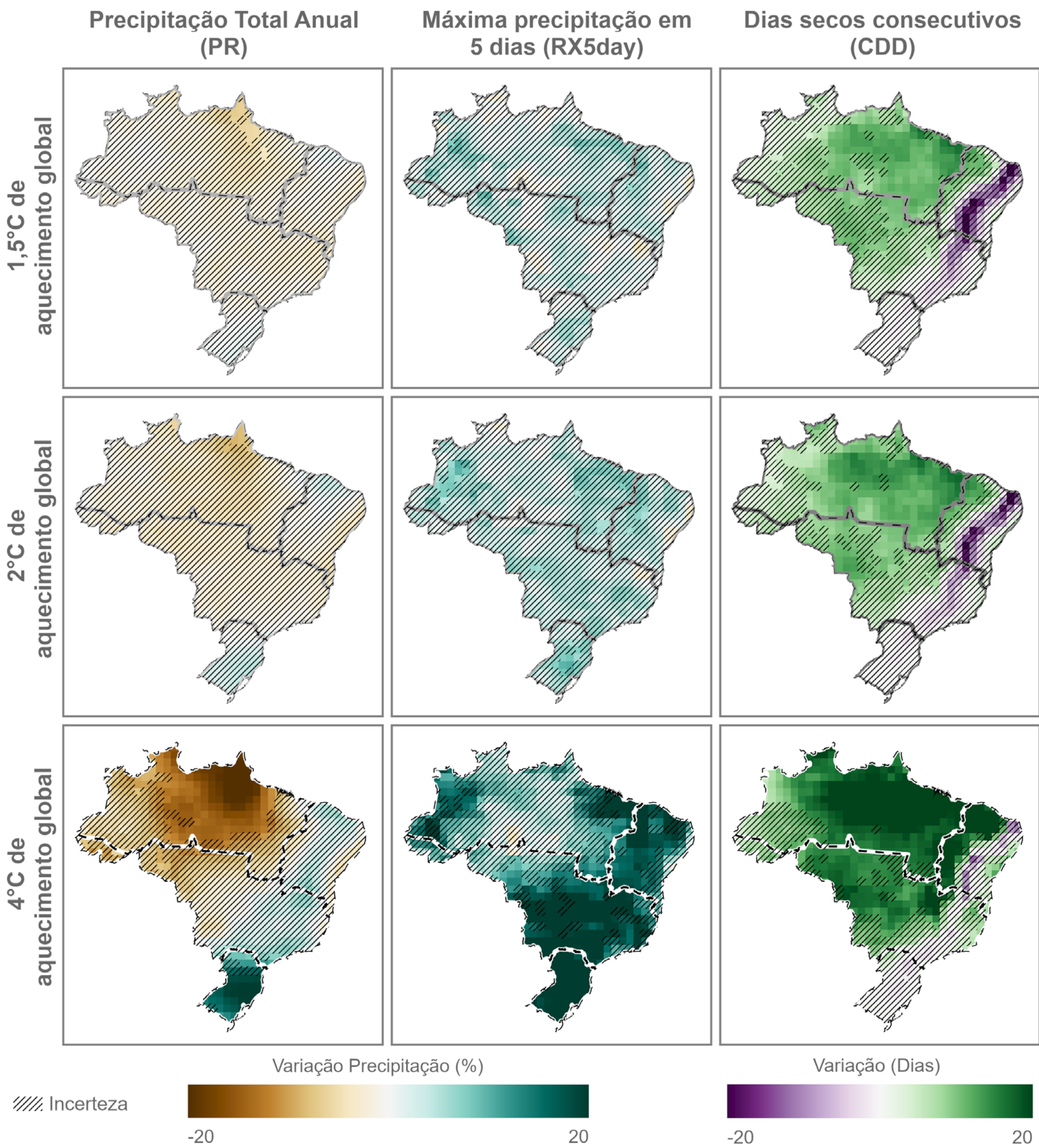
Aumento da chuva anual na região Sul
(média confiança)



Aumento da frequência e duração das secas nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste
(alta confiança)



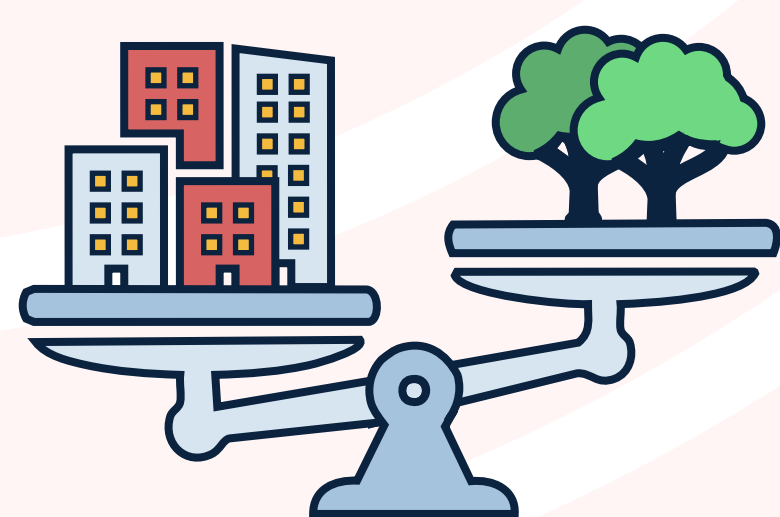
Aumento das chuvas extremas nas regiões Sudeste, Sul e Norte
(alta confiança)



Variações projetadas de Precipitação Total (PR em %), Dias Secos Consecutivos (CDD em dias) e Máxima Precipitação em 5 dias (RX5day em %) para os níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C em relação a 1995-2014.

Atlas Interativo (IPCC, 2021)

Embora **influenciada pela variabilidade da precipitação**, a geração de energia depende **das vazões afluentes às hidrelétricas** e que estão relacionadas não apenas ao comportamento das chuvas, mas também a uma série de outros fatores como **a capacidade de regularização das vazões por meio de reservatórios, os usos da água na bacia hidrográfica, a evapotranspiração e, ainda, outros aspectos que influenciam o escoamento da água, como a cobertura vegetal e tipo de solo.**



QUAIS AS CARACTERÍSTICAS QUE DEIXAM AS HIDRELÉTRICAS MAIS VULNERÁVEIS AOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS?

UHEs com Reservatórios a fio d'água

Usinas a fio d'água têm pouca ou nenhuma capacidade de armazenamento de água em seus reservatórios, e, portanto, dependem diretamente do fluxo natural do rio para gerar energia. Dessa maneira esses projetos podem ter sua operação impactada em períodos de maior precipitação ou de escassez.

UHEs em bacias com conflitos pelo uso da água

Conflitos pelo uso da água podem ser intensificados pelas mudanças climáticas, em especial em cenários de secas intensas, reduzindo a disponibilidade de recursos e a flexibilidade operacional das hidrelétricas. De acordo com a Lei Federal 9.433/1977, em situações de escassez, os usos prioritários dos recursos hídricos são o consumo humano e a dessedentação de animais.

UHEs em bacias hidrográficas degradadas

Bacias hidrográficas com baixa cobertura vegetal e impermeabilizadas reduzem a capacidade do solo e da vegetação de reter e infiltrar água, levando a um maior escoamento superficial, erosão do solo e assoreamento de rios e reservatórios.

UHEs dimensionadas para vazões de referência inferiores ou superiores às que podem ocorrer em função das mudanças climáticas

Secas prolongadas podem resultar em vazões abaixo das mínimas operativas e interromper a operação das hidrelétricas, enquanto eventos de chuvas intensas podem exceder a capacidade dos projetos resultando em vertimentos ou em riscos às estruturas.

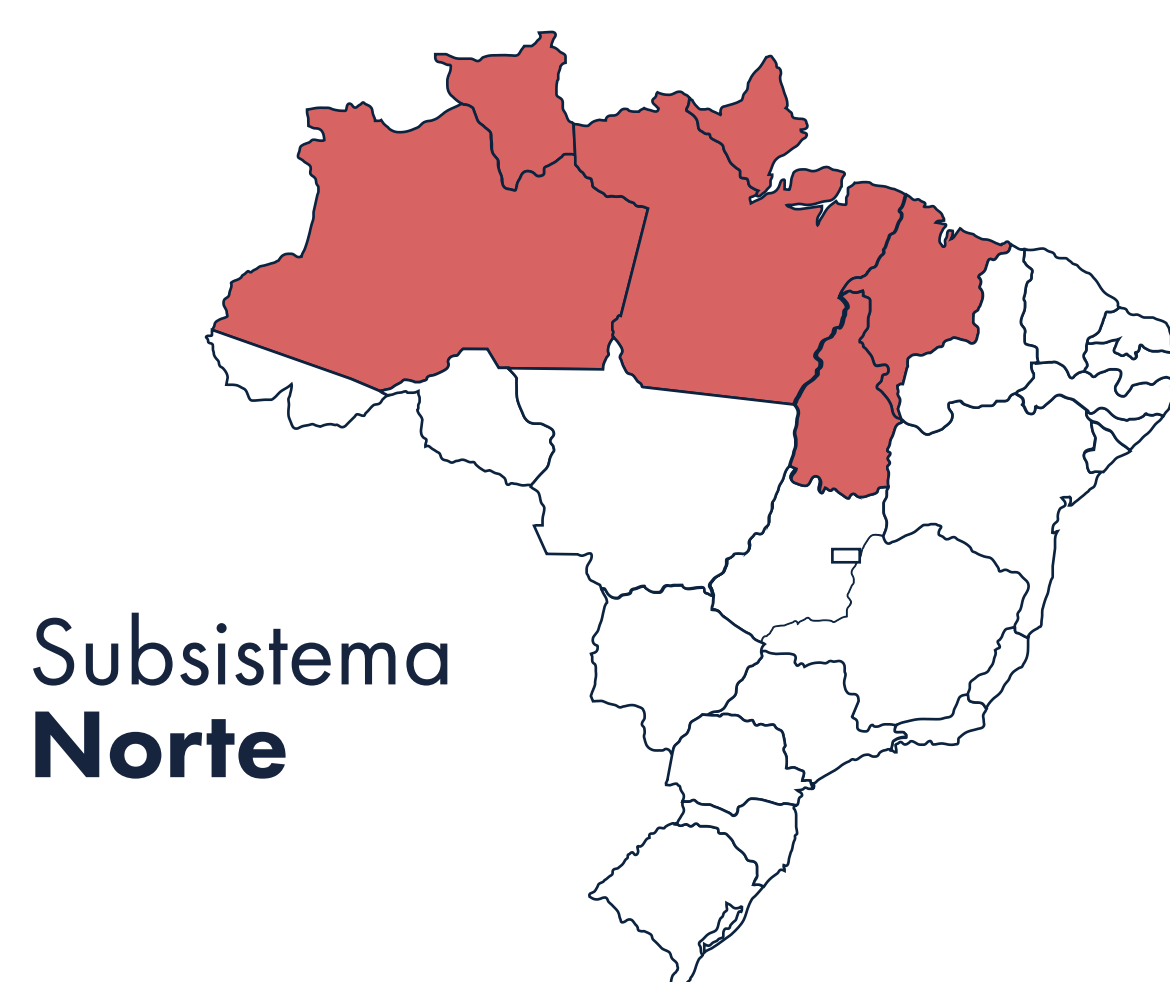
Reservatórios com grandes superfícies alagadas

Reservatórios de grandes superfícies são mais suscetíveis à evaporação, pois oferecem uma área extensa exposta ao calor e aos ventos.

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

SUBSISTEMA

CARACTERÍSTICAS E TENDÊNCIAS



Região com UHEs a fio d'água, sem grande capacidade de armazenamento, de baixas quedas e em rios com altas vazões. A geração hidrelétrica possui uma variação sazonal expressiva, acompanhando a variação anual das vazões.

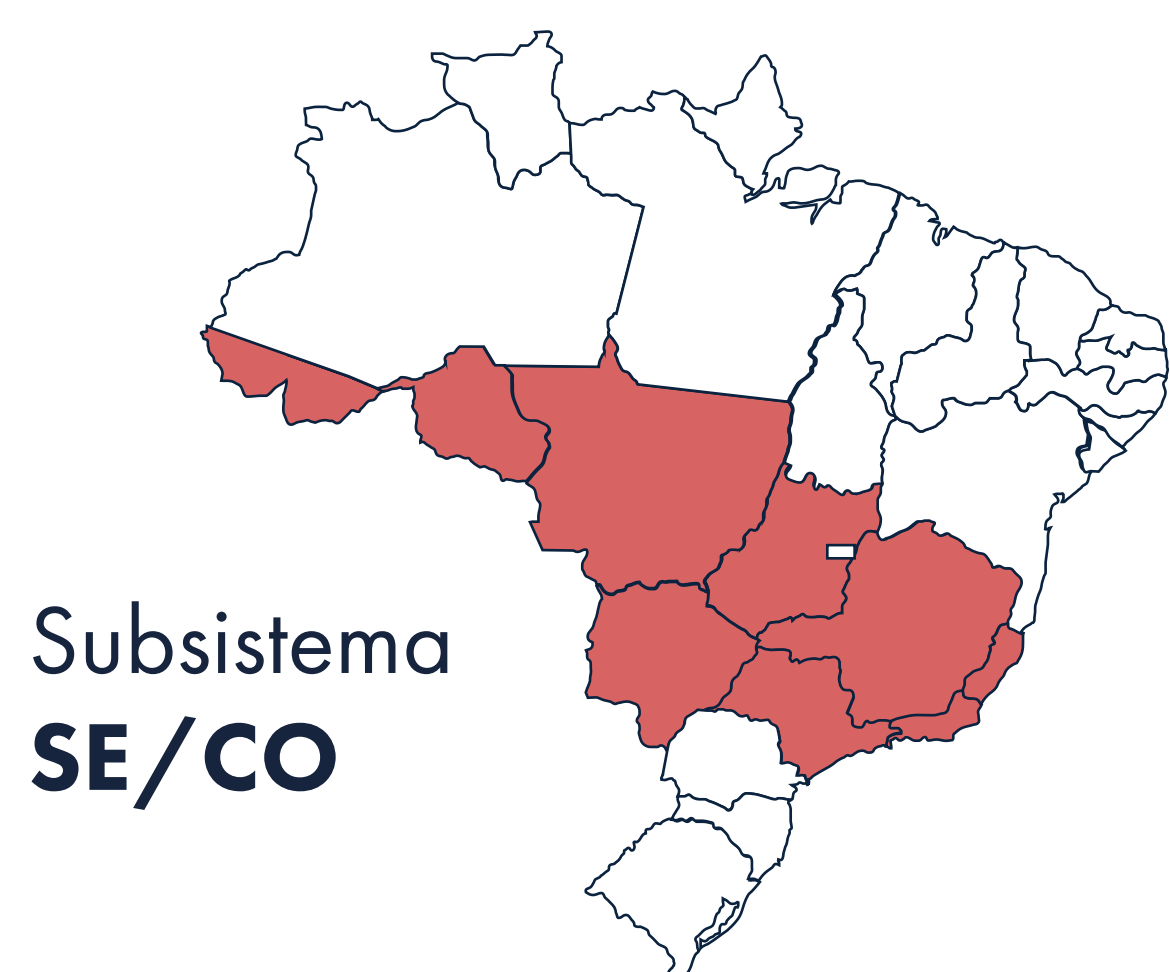
O **subsistema Norte** é responsável pela exportação de energia para outras regiões em determinados períodos do ano.

Tendência de redução da precipitação anual e da geração média anual.



No **Nordeste** estão importantes reservatórios de armazenamento do SIN. O clima na região é majoritariamente semiárido, com muitos rios intermitentes. Além disso, é uma região que possui importantes polos de irrigação e diversos usuários dos recursos hídricos.

Os cenários indicam **aumento da intensidade e duração das secas, o que aumenta a pressão sobre os reservatórios das hidrelétricas para atendimento a outros usos da água.**



No **Sudeste/Centro-Oeste** estão concentrados os principais reservatórios de armazenamento do SIN. Também é uma região com diversos usuários dos recursos hídricos.

Os **cenários indicam incertezas quanto ao comportamento da chuva média.** No entanto, há indicação de **aumento das vazões extremas e intensidade e duração das secas, o que aumenta a pressão sobre os reservatórios das hidrelétricas** para controle de cheias e atendimento a outros usos da água.



No Sul, a tendência é de aumento da vazão média, o que pode trazer benefícios para aumento da geração por meio de novos projetos e ou modernização e recapacitação dos existentes.

A **tendência de aumento na intensidade de chuvas extremas requer atenção e uma avaliação local sobre a capacidade dos vertedores e possíveis riscos às infraestruturas.**

PRINCIPAIS RISCOS CLIMÁTICOS ASSOCIADOS ÀS UHES:

- ✦ Redução da geração hidrelétrica; e
- ✦ Segurança das infraestruturas.

CONSTRUINDO CAMINHOS

QUAIS OS DESAFIOS PARA A INCORPORAÇÃO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ESTUDOS DE PLANEJAMENTO?

Incertezas em relação à disponibilidade hídrica futura:

As mudanças climáticas trazem consigo um desafio para os estudos de planejamento, em especial de sistemas amplamente baseados em fontes renováveis: o clima futuro não pode ser representado considerando apenas o clima passado. Nesse contexto, **a projeção do clima futuro é um desafio complexo**, e os **modelos climáticos incorporam um grau significativo de incerteza** devido a fatores como a dificuldade em prever a evolução das emissões de gases de efeito estufa e o crescimento populacional. Somam-se, ainda, as incertezas decorrentes das simplificações necessárias para a representação matemática dos sistemas hidrológicos.

Essas **incertezas** devem ser reconhecidas como parte inerente da **impossibilidade de prever o futuro de forma determinística** e apontam para a necessidade de desenvolver **novas ferramentas** para considerá-las.

Dessa forma, as abordagens de planejamento devem se apoiar na **construção de cenários** que, embora não sejam previsões exatas, ajudem a **identificar os futuros possíveis** e orientar **estratégias adaptativas**.

Complexidade do sistema energético:

A interdependência entre as diferentes fontes de energia, demanda, infraestruturas e mercados torna o processo de incorporação dos impactos das mudanças climáticas nos estudos de planejamento particularmente desafiador. Alterações em qualquer um desses elementos pode gerar efeitos em cadeia.

Mudanças nas políticas energéticas e ambientais afetam de forma significativa as estratégias de longo prazo do sistema elétrico, influenciando decisões sobre investimentos, tecnologias adotadas e padrões operacionais.

Esses fatores reforçam a necessidade de um planejamento flexível e resiliente, capaz de se adaptar às incertezas trazidas tanto pelo clima quanto pelo ambiente regulatório.

Equilíbrio entre Risco x Investimentos:

No contexto de adaptação às mudanças climáticas no setor elétrico, o equilíbrio entre riscos e investimentos envolve a busca por soluções para **manter a segurança no abastecimento de energia elétrica e a modicidade tarifária**. De um lado, é necessário investir em infraestrutura mais resiliente e em novas tecnologias. Por outro lado, esses investimentos precisam evitar aumento do preço da energia elétrica para os consumidores e o comprometimento da competitividade do setor.

Esse equilíbrio é fundamental para garantir que o setor elétrico possa continuar a operar de maneira eficiente e segura em um ambiente de crescente incerteza climática, sem comprometer sua sustentabilidade econômica e socioambiental, como a segurança energética do Brasil.

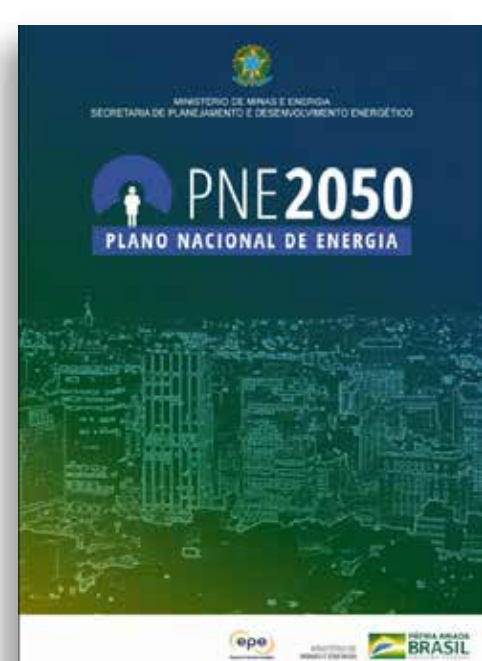
No contexto das mudanças climáticas a busca por **soluções eficazes** deve promover, ao mesmo tempo, **a adoção de políticas e medidas robustas**, que garantam a segurança energética diante de uma ampla gama de cenários futuros possíveis, **e flexíveis**, que possam ser adaptadas ou reajustadas ao longo do tempo, à medida que novos dados e informações se tornem disponíveis e os cenários climáticos evoluam.

COMO O TEMA TEM SIDO ABORDADO PELA EPE?

Clique nas imagens para saber mais.



O **Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE** avalia as **perspectivas de expansão** do setor de energia para os próximos 10 anos. Para a geração hidrelétrica são utilizados dois mil cenários hidrológicos de modo a buscar refletir a **variabilidade climática** futura. Nos PDEs 2031 e 2034, foram feitas análises de sensibilidade para avaliar a **resiliência** do sistema elétrico na ocorrência de **eventos críticos de escassez hídrica**.



O **Plano Nacional de Energia – PNE** busca orientar a **estratégia de longo prazo do setor energético no Brasil**. O PNE 2050 trouxe como desafios as **incertezas** sobre o efeito das mudanças climáticas na **oferta de energia** e a garantia da **segurança do abastecimento** em **eventos extremos**. No PNE 2055, em elaboração, as **questões climáticas** têm sido fundamentais na discussão de cenários futuros.



O estudo **Escassez Hídrica em 2021 - Diagnóstico e Oportunidades para o Planejamento da Expansão da Oferta de Eletricidade** analisou fatores estruturais que possam ter contribuído para os **desafios no fornecimento de energia durante a seca de 2020/2021**, incluindo uma avaliação dos padrões hidrológicos históricos e o possível impacto das



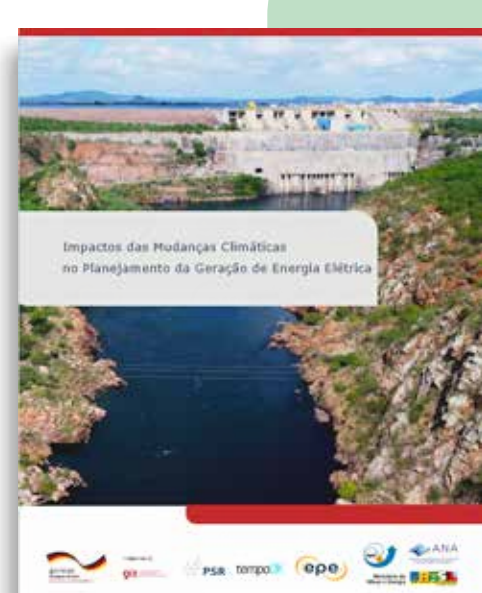
O **Plano de Recuperação dos Reservatórios de Regularização de Hidrelétricas do País (PRR)** propõe **31 ações**, no horizonte de **10 anos**, que contribuem **para a resiliência climática do sistema elétrico**, divididas em quatro eixos temáticos: aspectos físicos dos reservatórios, modelagens matemáticas, planejamento da operação e da expansão e dinâmica de operação dos reservatórios.



A EPE vem discutindo de maneira transparente soluções para a ampliação da **resiliência de sistemas radiais localizados no Norte**, visando manter o atendimento eletroenergético em cenários de escassez hídrica, como os observados em 2023 e 2024. O estudo do **Acre e Rondônia** foi concluído e o do **Amazonas e Amapá** está em elaboração.

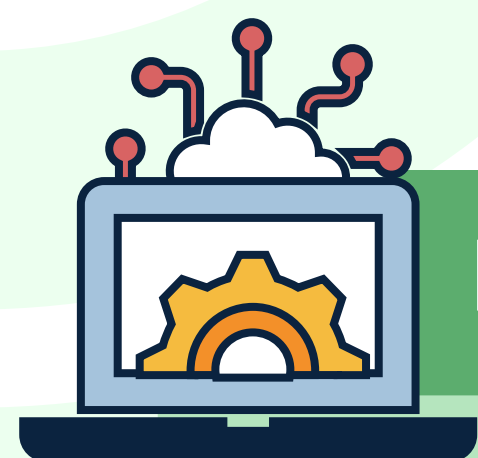


Está em desenvolvimento um projeto para estruturação e modelagem de **base de dados de indicadores e estatísticas socioambientais de riscos climáticos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas no setor de energia**, com o objetivo é oferecer uma ferramenta que possibilite identificar **tendências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



Está em desenvolvimento, em parceria com a GIZ e com apoio do MME, INPE e ANA, o estudo **"Impactos das Mudanças Climáticas no Planejamento da Geração de Energia Elétrica"**, que visa avaliar a **resiliência da matriz elétrica** considerando o efeito das **mudanças climáticas** na disponibilidade de **recursos energéticos renováveis**, assim como na **demandas de energia elétrica**.

O QUE PODE SER FEITO?



Promover tecnologia e inovação

- ✦ Incentivar modernização e recapacitação de usinas existentes.
- ✦ Ampliar tecnologias de armazenamento (UHEs com reservatório de regularização, usinas reversíveis e baterias).
- ✦ Fomentar pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para geração, transmissão e armazenamento de energia.



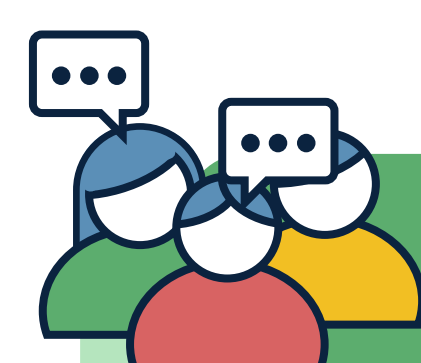
Aprimorar metodologias

- ✦ Considerar projeções futuras na cenarização da disponibilidade hídrica.
- ✦ Aprimorar a representação da geração das UHE.
- ✦ Reavaliar critérios de atendimento aos requisitos do sistema.
- ✦ Revisar critérios de levantamento e dimensionamento de UHEs.
- ✦ Estabelecer diretrizes visando a elaboração de planos de adaptação para os projetos/empreendimentos.
- ✦ Monitorar e sistematizar dados relativos a ameaças, vulnerabilidades e riscos.



Avançar na regulamentação

- ✦ Desenvolver novos desenhos de mercado visando a resiliência sistêmica.
- ✦ Revisar regulação considerando atributos e requisitos do sistema (armazenamento, flexibilidade, serviços ancilares, atendimento à ponta).
- ✦ Criar incentivos regulatórios para adoção de ações de adaptação para os projetos/empreendimentos.



Ampliar comunicação

- ✦ Articular com atores envolvidos nas áreas de energia, recursos hídricos, meio ambiente e outras.
- ✦ Buscar parcerias com instituições de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico.
- ✦ Promover diálogo sobre questões relacionadas às usinas hidrelétricas e mudanças climáticas.

COORDENAÇÃO GERAL

Thiago Guilherme Ferreira Prado
Thiago Ivanoski Teixeira

COORDENAÇÃO EXECUTIVA

Elisangela Medeiros de Almeida

EQUIPE TÉCNICA

Ana Dantas Mendez de Mattos
Alfredo Lima Silva
Gustavo Fernando Schmidt
Maria Clara Tenório (estagiária)
Paula Cunha Coutinho (coord.)

PARTICIPAÇÃO

Amanda Vinhoza
André Makishi

PARTICIPAÇÃO (CONT.)

Caio Leocadio
Cristiane Moutinho Coelho
Gustavo Pires da Ponte
Guilherme de Paula Salgado
Leandro Andrade
Luciano Basto Oliveira
Lucas Simões de Oliveira
Mariana Pinheiro (facilitadora)
Rafael Rigamonte
Rachel Martins Henriques

ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL

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

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