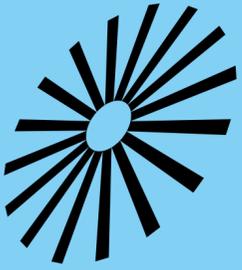


**COALIZÃO
ENERGIA
LIMPA**

transição justa
e livre do gás



**Vulnerabilidade
do setor elétrico
brasileiro frente
à crise climática
global e propostas
de adaptação**



**COALIZÃO
ENERGIA
LIMPA**

transição justa
e livre do gás

**Vulnerabilidade
do setor elétrico
brasileiro frente
à crise climática
global e propostas
de adaptação**

REALIZAÇÃO

Coalizão Energia Limpa

ORGANIZAÇÃO

ClimaInfo

APOIO

Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (Idec), Instituto Clima e Sociedade (iCS), Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema), Instituto de Estudos Socioeconômicos (Inesc), Instituto Internacional Arayara e Instituto Pólis

COMO CITAR

Vulnerabilidade do setor elétrico brasileiro frente à crise climática global e propostas de adaptação. Sumário Executivo. São Paulo, 2023.

COORDENAÇÃO GERAL

Carolina Marçal e Délcio Rodrigues (Instituto ClimaInfo)

AUTORES

Dr. José Wanderley Marangon Lima, Dr. Lincoln Muniz Alves e Dr. José Antonio Marengo

EDIÇÃO DE TEXTO

Carolina Marçal, Célia Mello, Délcio Rodrigues e Silvia Dias

REVISÃO

Célia Mello

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Fábrica de Ideias Brasileiras

Veja o estudo completo em
climainfo.org.br/relatorio-coalizao-energia-limpa

COALIZÃO ENERGIA LIMPA

A Coalizão Energia Limpa – transição justa e livre do gás é um grupo brasileiro de organizações da sociedade civil comprometido com a defesa de uma transição energética socialmente justa e ambientalmente sustentável no Brasil, que rejeita o uso do gás na matriz energética e defende a eliminação desta fonte até 2050.

Temos como objetivo articular e facilitar ações para promover a transição energética por meio de redução e/ou eliminação de fontes de geração energética fóssil a gás; de redução e/ou eliminação da exploração de reservas de hidrocarbonetos como o xisto; e da importação de gás natural liquefeito (GNL).

Fazem parte da Coalizão Energia Limpa: Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (Idec), Instituto ClimaInfo, Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema), Instituto de Estudos Socioeconômicos (Inesc), Instituto Internacional Arayara e Instituto Pólis.

SUMÁRIO

01	O clima hoje no mundo e no Brasil	15
02	O sistema elétrico brasileiro	23
03	A necessidade de quantificar a ameaça climática	28
04	Vulnerabilidade e resiliência do setor elétrico brasileiro frente às mudanças climáticas	35
05	Principais ações	39
06	Bibliografia	45

AUTORES

DR. JOSÉ W. MARANGON LIMA

Fez Engenharia Elétrica pelo IME/RJ (1979); Administração de Empresas pela UFRJ/RJ (1980); Mestrado pela EFEI/MG (1991); Doutorado pela COPPE/UFRJ (1994); e Pós-doutorado pela *University of Texas at Austin* (2005-2006). Foi engenheiro sênior da Eletrobrás (1980-1993). Em 1994, passou a integrar o quadro de professores da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), tornando-se professor titular em 1998. Foi pesquisador 1 do CNPq de 1995 a 2015. Consultor *ad-hoc* da FAPEMIG, CNPq e CAPES. É *Senior Member* do IEEE e CIGRÉ. Tem mais de 50 dissertações de mestrado e teses de doutorado orientadas. Em 1998 e 1999, foi assessor da diretoria da ANEEL. Participou, em 2003 e 2004, do GT MME que elaborou o novo marco do setor elétrico (Lei 10.848/04). Coordenou o Curso de Especialização em Sistemas Elétricos (CESE), com ênfase em geração e transmissão, de 1994 a 2013. Publicou mais de 200 artigos em revistas internacionais especializadas em seminários nacionais e internacionais. Foi convidado a ministrar palestras em vários países da América do Sul e nos Estados Unidos, México, Portugal etc. Prestou serviços de consultoria para a ANEEL, ONS, ASMAE, Eletrobrás, Petrobrás etc. Atualmente é consultor da MC&E e Secretário de P&D do INEL.

DR. LINCOLN MUNIZ ALVES

Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Autor-líder do Grupo de Trabalho I (WGI) do Sexto Relatório de Avaliação. Vice-Presidente do Grupo de Trabalho Ciência e Pesquisa da Região III (América do Sul) da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Membro nos WCRP Regional Information for Society (RIFS) Core Project's Scientific Steering Group. Foi consultor do MCTI, Banco Mundial, PNUD, CEPAL/ONU. Responsável por fornecer informação técnico-científica para orientar as políticas públicas de adaptação às mudanças ambientais. Possui mais de 15 anos de experiência em projetos e estudos nacionais e internacionais sobre os seguintes temas: climatologia, modelagem do clima, interação biosfera-atmosfera e Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas.

DR. JOSÉ ANTONIO MARENGO

Pesquisador 1-A do CNPq. Atualmente é Coordenador Geral de Pesquisa e Desenvolvimento do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais CEMADEN. É autor de mais de 250 artigos, capítulos de livros, livros, relatórios técnicos e trabalhos de congressos. Colaborou como autor dos relatórios do IPCC desde 1998 até o IPCC AR6 em 2021. É membro titular da Academia Brasileira de Ciências, da Academia de Ciências de Nova Iorque e da Academia Mundial de Ciências (TWAS). Tem desenvolvido estudos de avaliação de tendências climáticas e extremos no contexto de impactos-vulnerabilidade-adaptação e redução de risco de desastres naturais no presente e em cenários de clima futuro. Além disso tem colaborado ativamente na elaboração do Plano Nacional de Adaptação, no Plano Nacional de Mudanças Climáticas e na Segunda, Terceira e Quarta Comunicação Nacional do Brasil a UNFCCC.

RESUMO



- Com quase dois terços (cerca de 60%) de hidroeletricidade, ou seja, energia renovável, **o Brasil é um dos grandes produtores mundiais de energia hidrelétrica, respondendo por 10% da produção mundial.** Todavia, ela é fortemente dependente de variações climáticas, como as chuvas essenciais para as afluências aos reservatórios dessas usinas. Por isso, com a mudança do comportamento das chuvas devido às mudanças climáticas, esta geração está cada vez mais ameaçada.
- **O Brasil sofreu as piores secas da história na última década,** levando a quedas pronunciadas na disponibilidade hídrica em importantes bacias hidrográficas responsáveis por garantir o abastecimento humano e do sistema elétrico brasileiro. Desde a seca ocorrida em 2014/2015 na região Sudeste, várias bacias foram fortemente afetadas e permaneceram em estado crítico até o ano passado.
- **Em 2021, o país viveu sua pior crise hídrica dos últimos 90 anos, desencadeando outra crise - a energética.** A maioria das usinas hidrelétricas encerraram a estação chuvosa de 2020-2021 operando com uma fração de sua capacidade total, colocando assim a geração hidrelétrica do país em regime crítico.
- Apesar do montante de chuva neste verão de 2021-2022 ter conseguido melhorar o volume dos reservatórios, as projeções indicam uma diminuição da precipitação nos próximos anos.
- Apesar da média anual de precipitação estar diminuindo em algumas regiões do

Brasil, existe também uma diminuição do período úmido e aumento no período seco, ocasionando aumento da variabilidade climática que é nociva à regularização da geração de energia.

- **Ainda que exista um esforço global para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa que provocam o aquecimento global, ele é insuficiente** diante da magnitude dos impactos decorrentes desse fenômeno, que já têm sido observados com uma elevação média da temperatura do planeta em 1,1°C. Como a meta do Acordo de Paris propõe limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, o que estamos vendo pode se agravar.
- Para o Brasil, as tendências de aumento de temperatura devem continuar ao longo do século 21 a uma taxa superior à média global. Projeções apontam uma redução das vazões das usinas localizadas nas regiões Norte e Nordeste. Para as usinas no Sul e em parte do Sudeste, a tendência é de aumento das vazões. Para a bacia do Paraná, existe uma incerteza devido à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), onde os modelos climáticos divergem quanto ao aumento ou à diminuição da precipitação.
- Apesar de já haver uma preocupação do poder público e a incorporação de cenários no processo de planejamento do setor elétrico, não existem ações concretas suficientes e nem o desenvolvimento de políticas públicas necessárias para lidar com a magnitude do problema. **Se a dinâmica das alterações do clima não é considerada adequadamente,**

todo o planejamento do sistema de geração de energia fica vulnerável e comprometido.

Trabalhar com as séries históricas ou sintéticas de precipitação significa esperar um volume de chuva médio que pode não ocorrer.

- **O sistema elétrico como um todo precisará ser mais resiliente ao clima sem ficar mais sujo**, como aconteceu no passado recente, com a contratação de termelétricas fósseis, principalmente movidas a gás natural, o que não nos parece uma boa opção mesmo para lidar com a intermitência das usinas renováveis. A diminuição máxima possível das emissões é um imperativo e deve ser uma diretriz norteadora de todos os segmentos da economia.
- Por isso, é urgente adotar uma nova forma de planejar, operar e governar o sistema elétrico nacional. A solução deve ser multifacetada e exigirá maior **diversificação da matriz elétrica para se desenvolver um sistema resiliente às mudanças climáticas.**
- Tornar o sistema elétrico brasileiro mais resiliente começa com o mapeamento de suas vulnerabilidades. Depois, é necessário traçar um **plano de resiliência e adaptação** para se o setor, com ações concretas para minimizar os impactos das mudanças climáticas principalmente na geração de energia, mas também em transmissão e distribuição. Em função da intermitência da geração renovável, representada principalmente por solar e eólica, há necessidade de se ter uma maior reserva de potência no sistema interligado, além de um maior armazenamento de energia para se enfrentar estações com menores

precipitações e com aumento de temperatura, o que ocasiona maior consumo de energia.

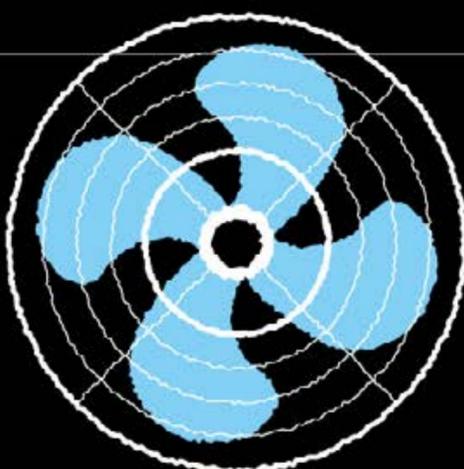
- A diminuição das precipitações que é esperada nas regiões Norte e Nordeste não recomenda a implantação de novas centrais hidrelétricas, principalmente se forem usinas a fio d'água. Mas esse é o caso do complexo de usinas no rio Tapajós, que está sendo previsto para depois de 2030 pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e que precisa ser reavaliado à luz das projeções climáticas.
- Já o incremento nos ventos e na radiação solar projetado para o Nordeste sugerem que esta região deverá ser uma grande exportadora de energia renovável.
- Sistemas distribuídos tendem a ser mais resilientes a eventos climáticos extremos. Soluções locais como, por exemplo, a instalação de baterias em residências junto com geração fotovoltaica, podem minimizar os efeitos adversos do clima.
- Uma alternativa adicional para enfrentar a ameaça climática seria dispor de tecnologias de armazenamento como baterias, hidrogênio verde, usinas hidrelétricas reversíveis etc. Dessa forma, a necessidade de termelétricas fósseis ocorreria apenas em situações emergenciais e transitórias, permitindo que o país desempenhe um papel de liderança global na redução de gases do efeito estufa.
- Como o Brasil já viu no litoral norte de São Paulo, na serra fluminense, na Bahia, em Minas Gerais, Tocantins, Pará e tantos outros lugares, os impactos do clima afetam a

população em diferentes escalas e formas, e sistematicamente ampliam as desigualdades sociais. Nesse contexto, diversificar a matriz elétrica, elevando a participação das fontes renováveis solar e eólica, permitiria a **redução dos custos da energia** elétrica, gerando maior competitividade internacional dos produtos brasileiros. Além da transição em si, os efeitos benéficos sobre a economia ofereceriam uma oportunidade para diminuir desigualdades sociais.

- É fundamental que o Estado brasileiro planeje e oriente a expansão das energias renováveis sem que, no entanto, repita-se o modelo historicamente adotado para o setor, pelo qual os Povos Indígenas e as Comunidades Tradicionais são invariavelmente violados na garantia de seu direito territorial. **O processo de aprovação e licenciamento deve assegurar a aplicação de salvaguardas que garantam os direitos territoriais e a consulta livre prévia e informada aos Povos Indígenas e Comunidades Tradicionais.**



1



**O CLIMA HOJE
NO MUNDO E
NO BRASIL**

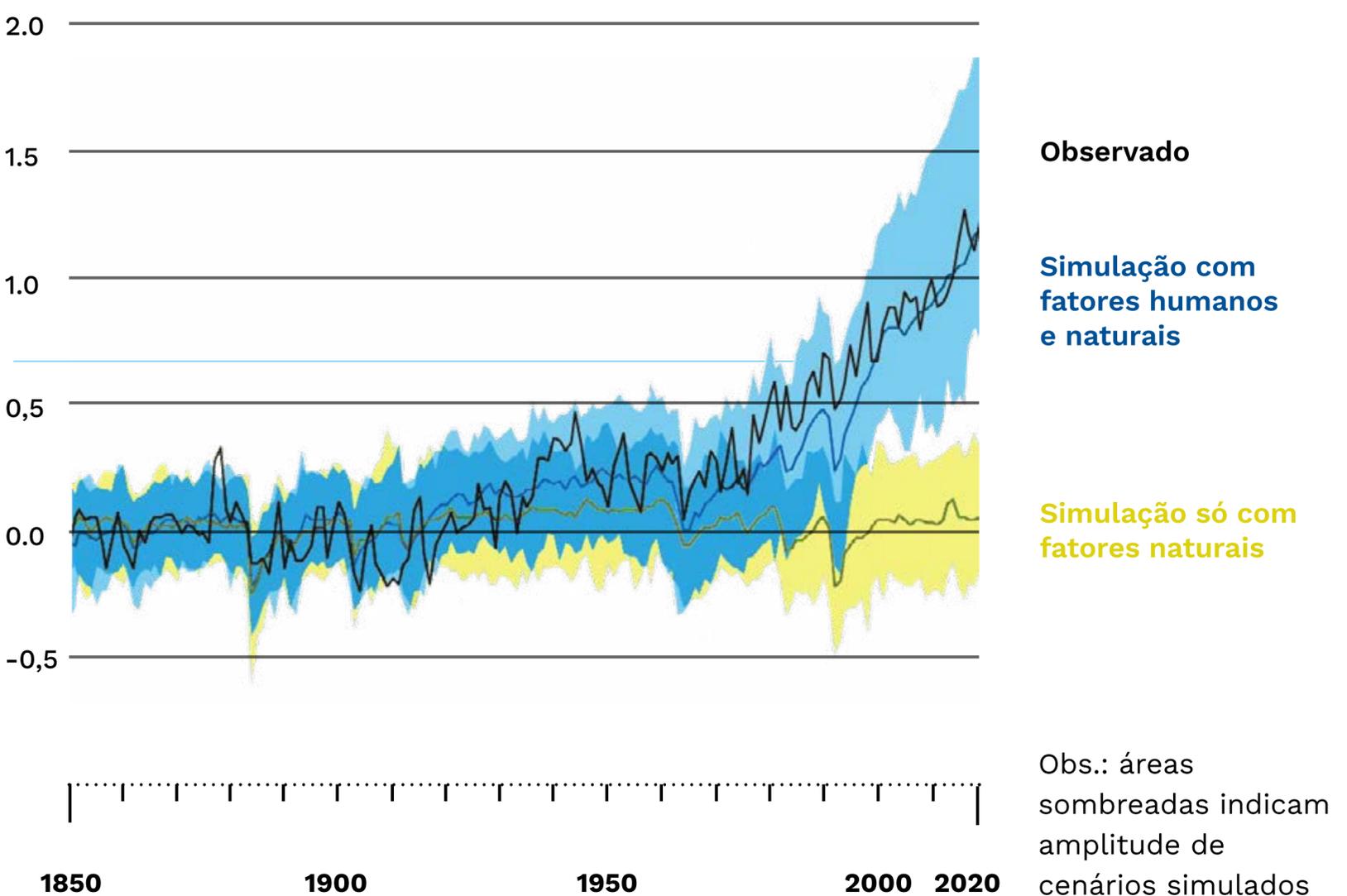


Há evidências contundentes de que as atividades humanas estão alterando profundamente o clima da Terra e de que o aquecimento global está ocorrendo a uma taxa sem precedentes, chegando a 1,1°C de aumento da temperatura média do planeta desde o início da Era Industrial, por volta de 1850 (IPCC, 2021). Elas estão, portanto, alterando os padrões históricos das variáveis climáticas (IPCC 2021, 2022).

FIGURA 1

Influência humana tem aquecido o clima

Variação na temperatura global média em relação a 1850-1900, com temperaturas observadas e simulações matemáticas



Fonte: IPCC, 2021: Sumário para os formuladores de políticas.

A análise das tendências climáticas observadas no Brasil nas últimas quatro décadas revela um aumento da temperatura em todas as regiões brasileiras. Em geral, verificou-se aumento de 0,5°C por década nas temperaturas mínima e máxima médias, chegando a 1°C em certas regiões no inverno e na primavera. Essa tendência é acompanhada de um aumento no número de dias com temperatura máxima extrema, com incremento superior a 30% em praticamente todo o país (Santos et al., 2020).

No tocante à precipitação, observou-se mudanças regionais significativas tanto de redução quanto de aumento da precipitação anual. Reduções (de até 20 mm) no acumulado anual foram observadas no sudoeste da região Norte, no leste da região Centro-Oeste, e nas regiões Nordeste e Sudeste. Incrementos foram observados no extremo norte da região Norte (de até 40 mm), na região Sul (de até 20 mm) e em áreas nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. As observações também indicam aumento em frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação, tais como aumento de secas em extensa área da porção central do país (Santos et al., 2020).

A análise das tendências climáticas observadas no Brasil nas últimas quatro décadas revela um aumento da temperatura em todas as regiões brasileiras.

FIGURA 2

Tendência das temperaturas mínimas, máximas e extremas (TX90p), precipitação média, acumulada em cinco dias (RX-5day) e do número máximo de dias secos consecutivos para as diferentes regiões do Brasil no período nas últimas décadas.

O mapa a seguir é uma simplificação das tendências climáticas observadas de indicadores de temperatura e precipitação no período de 1980-2018, baseadas no artigo de Dos Santos et al. (2020), cuja variação tem impacto em setores estratégicos da sociedade.

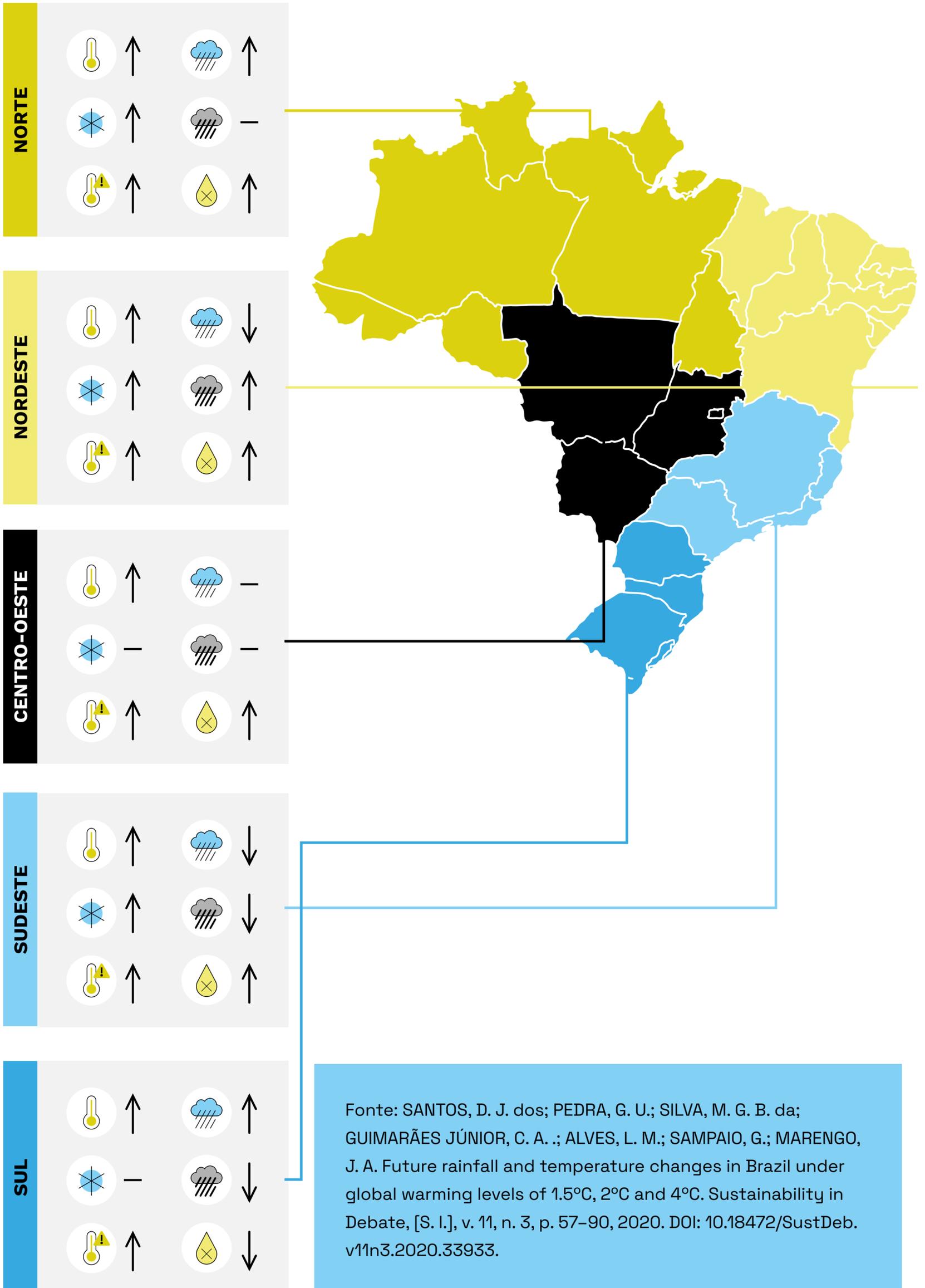
VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO FRENTE A CRISE CLIMÁTICA

VARIÁVEL

- | | |
|---|--|
|  TEMPERATURA MÁXIMA |  DIAS CONSECUTIVOS SECOS (CDD) |
|  TEMPERATURA EXTREMA |  PRECIPITAÇÃO MÉDIA |
|  TEMPERATURA MÍNIMA |  PRECIPITAÇÃO ACUMULADA EM CINCO DIAS |

TENDÊNCIA

- ↑ AUMENTO
- ↓ DIMINUIÇÃO
- SEM SINAL CLARO



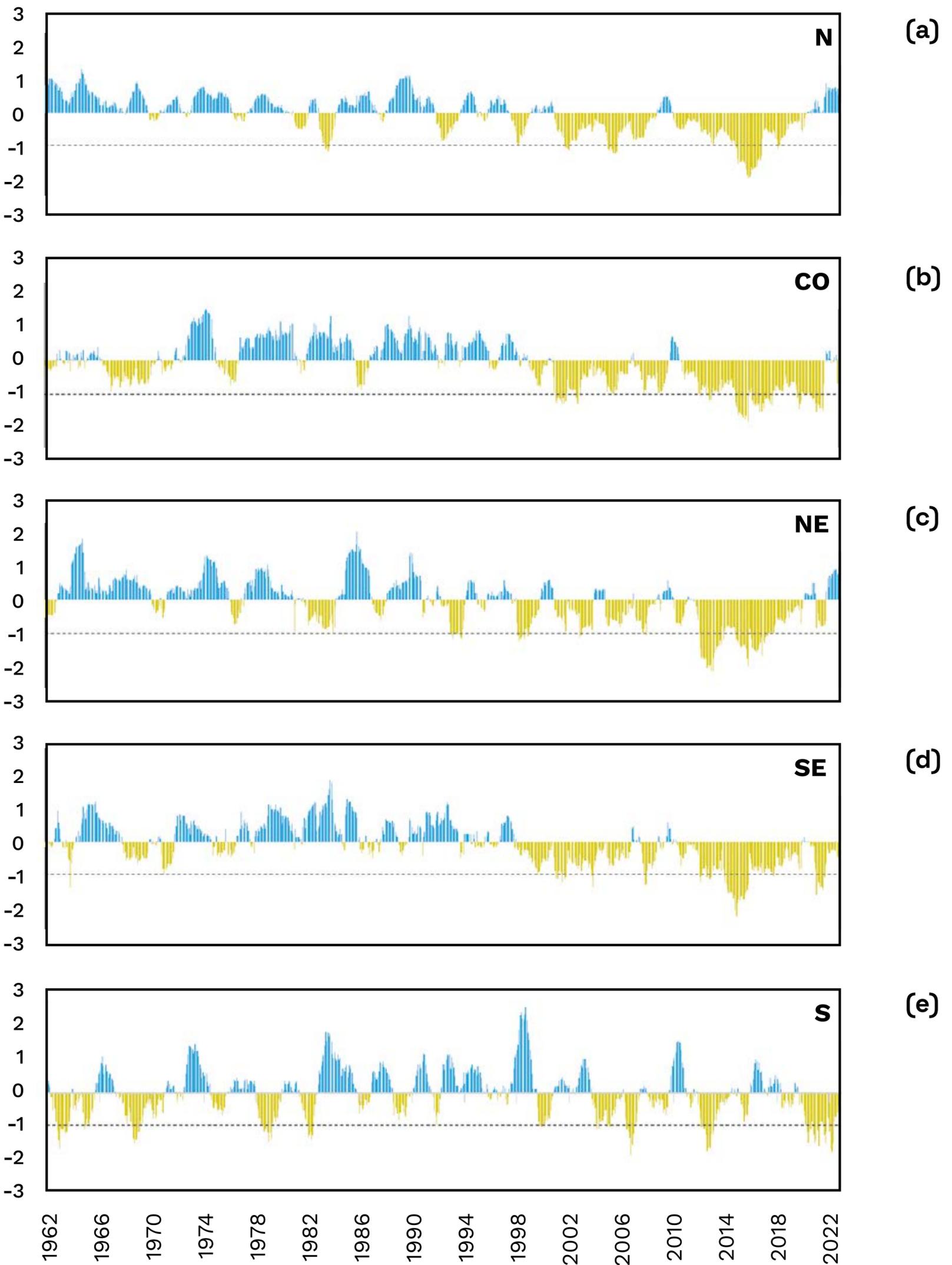
A **Figura 3** mostra a série temporal do índice de Precipitação Padronizado (do acrônimo em inglês *Standard Precipitation Index* – SPI)¹, comumente utilizado para o monitoramento de condições associadas a secas e excesso de chuva, observada no Brasil para 12 meses (SPI-12). O SPI-12 mostra que, desde o ano 2000, todas as regiões apresentam SPI negativos (cor vermelha), o que representa uma tendência de redução de chuva, em comparação com a década de 1960 ou 1970. Esta tendência parece ser mais intensa nos últimos 10 anos.

O Brasil sofreu na última década as piores secas da história, resultando em graves impactos socioeconômicos e ambientais. Como consequência, observamos

¹ O Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index* - SPI) é uma ferramenta consistente de detecção e monitoramento probabilístico/padronizado de déficit ou excesso de precipitação para diferentes escalas temporais, possibilitando a comparação entre regiões com diferentes características climáticas.

FIGURA 3

Variação mensal do SPI-12 de 1962-2019 para regiões do Brasil: (a) N: Norte; (b) CO: Centro-Oeste; (c) NE: Nordeste; (d) SE: Sudeste; e (e) Sul.



Fonte: Cunha et al. (2019)

queda pronunciada na disponibilidade hídrica e, portanto, ameaça à segurança hídrica em importantes bacias hidrográficas responsáveis por garantir o abastecimento do sistema elétrico brasileiro. Desde a seca ocorrida em 2014/2015 na região Sudeste do Brasil, várias bacias foram fortemente impactadas e permanecem em estado crítico até os dias atuais. A maioria das usinas hidrelétricas encerraram a estação chuvosa de 2020-2021 operando com uma fração de sua capacidade total, colocando assim a geração hidrelétrica do país em regime crítico.

Os recentes relatórios do IPCC (IPCC 2021, 2022) sugerem que este tipo de mudança nos padrões hidrometeorológicos tem fortes indícios de impactos das atividades humanas relacionados ao aquecimento global. O aumento nas emissões de gases de efeito estufa e o aumento no desmatamento da Amazônia poderiam amplificar os extremos de clima, levando a situações de secas e chuvas intensas mais frequentes. Certamente isso levou a crises hídricas como a de 2001 e a de 2013-14 e que continuam até o momento. Apesar do esforço global para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa que provocam as mudanças climáticas, a implantação de medidas de adaptação é insuficiente diante da magnitude dos impactos decorrentes desse fenômeno, que já têm sido observados em todas as regiões habitáveis do planeta, e que podem se agravar mesmo em um cenário no qual conseguimos limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.

O Brasil sofreu na última década as piores secas da história, resultando em graves impactos socioeconômicos e ambientais.

ENTRE 2014 E 2015

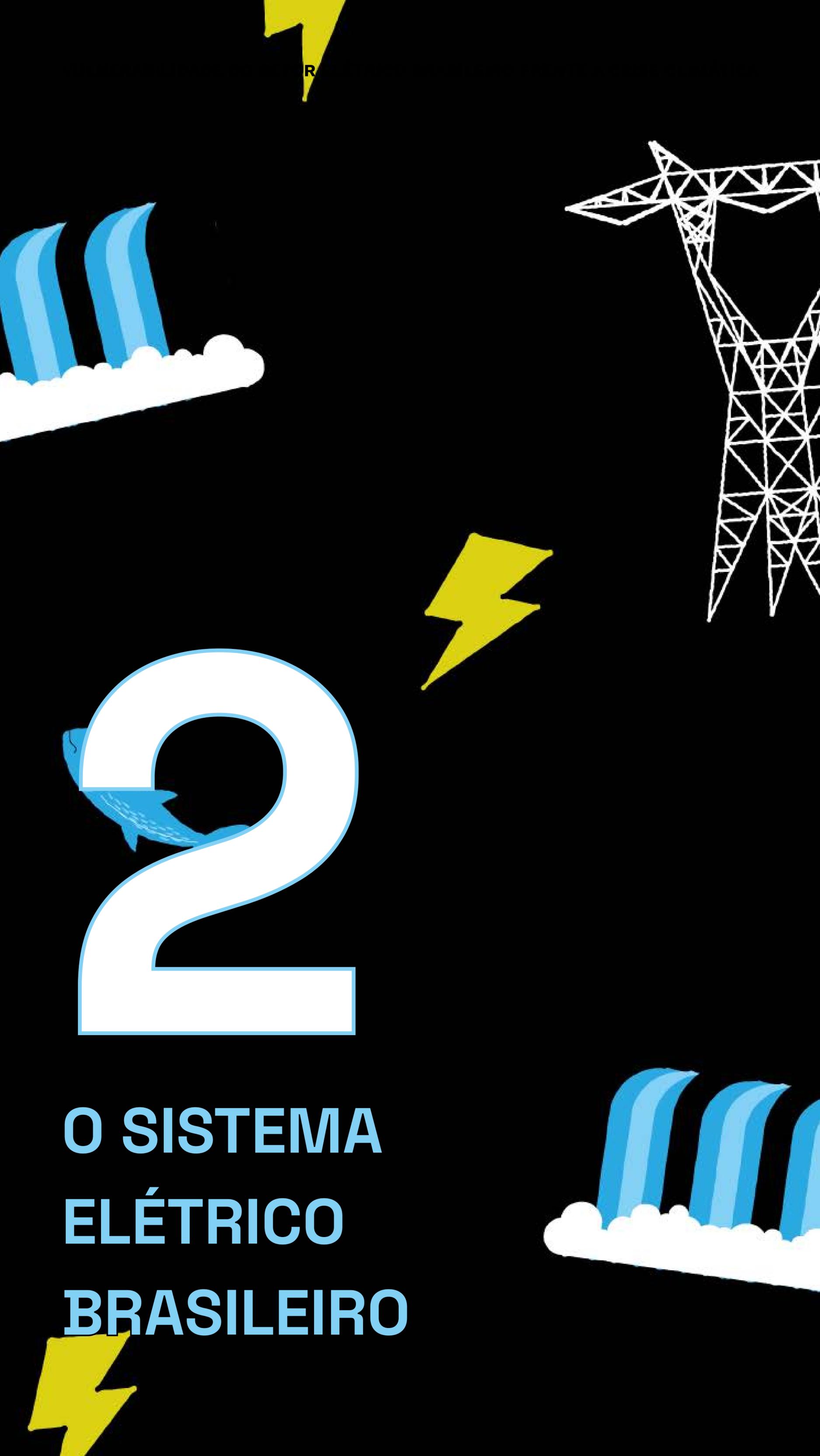
Várias bacias foram fortemente afetadas pela seca que aconteceu na Região Sudeste neste período e permanecem em estado crítico.

ENTRE 2020 E 2021

O Brasil viveu a pior crise hídrica dos últimos 90 anos, desencadeando uma crise energética. A maioria das usinas hidrelétricas encerrou a estação chuvosa operando com uma fração de sua capacidade total.

ENTRE 2021 E 2022

Mesmo com a melhoria do volume nos reservatórios, as projeções indicam uma diminuição na média anual de precipitação de chuvas próximos anos.



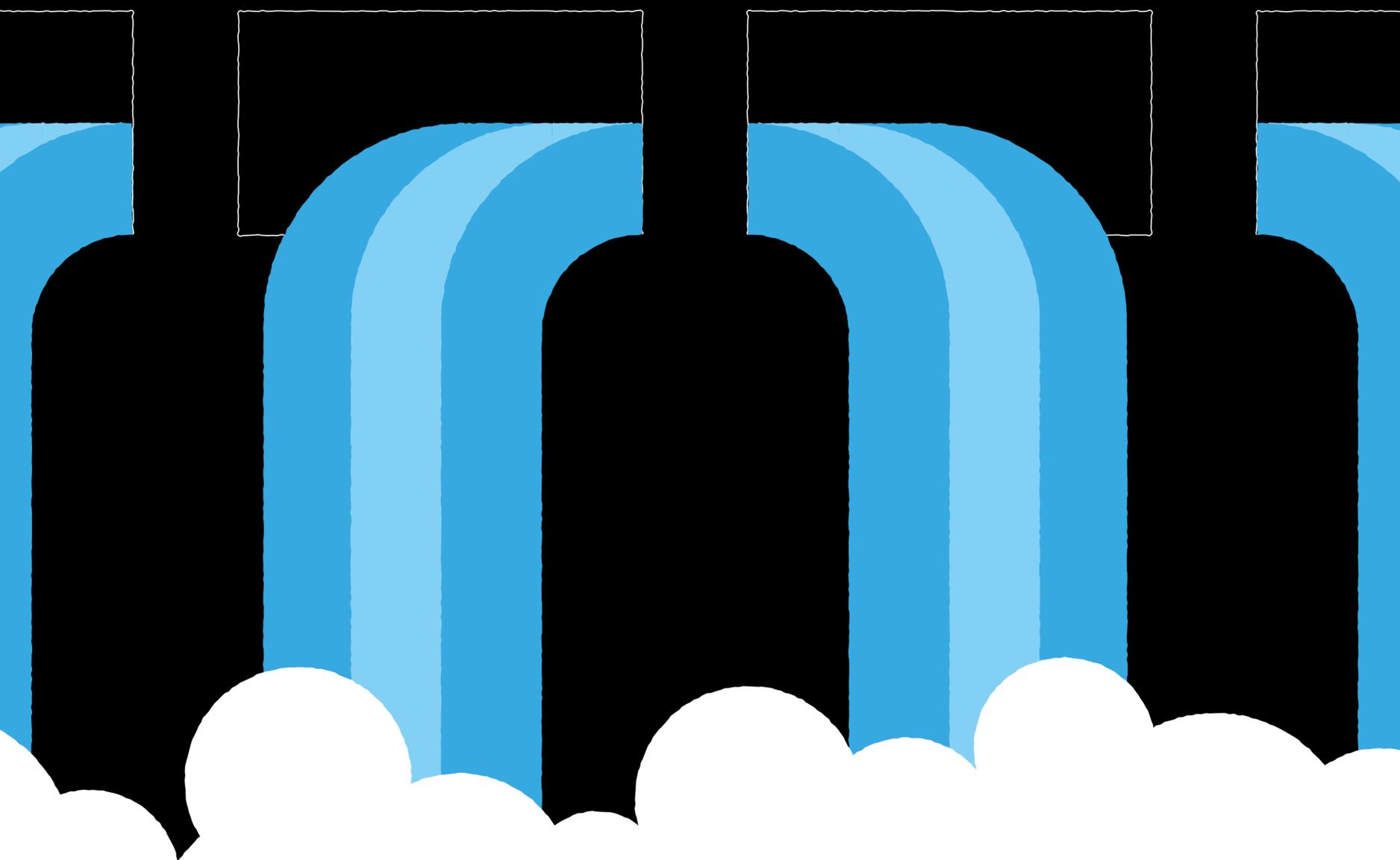
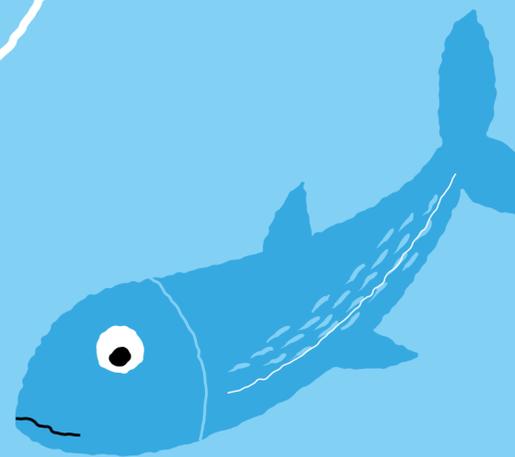
2

O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO



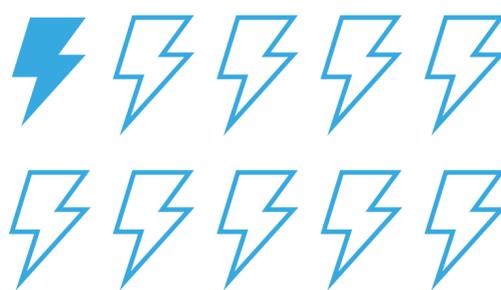
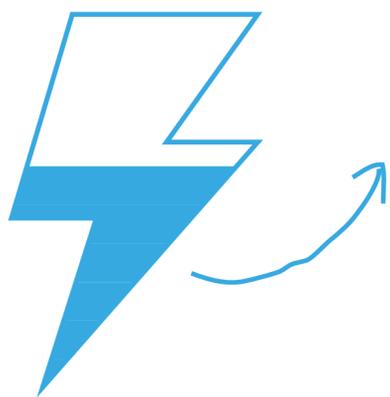
O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de energia hidrelétrica, respondendo por 10% da produção mundial. De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME), a participação atual da hidroeletricidade gira em torno de 60% da matriz elétrica brasileira. Esse sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazos para a produção de energia firme e, portanto, para garantia de atendimento. Isso implica em alta vulnerabilidade a alterações no regime hidrológico, de forma que as mudanças climáticas podem impactá-lo consideravelmente. O planejamento e a operação do sistema, que já são atividades incertas devido à variabilidade climática natural, se tornaram muito mais incertos devido às mudanças no clima. Um exemplo disso é o fato da utilização da série estatística estacionária nos modelos tradicionais do setor elétrico para previsão de precipitação e dimensionamento da operação dos reservatórios não estar gerando previsões consistentes, mesmo para horizontes curtos.

VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO FRENTE A CRISE CLIMÁTICA



O Brasil é um dos grandes geradores mundiais de energia hidrelétrica, um tipo de energia renovável que representa:

cerca de
60%
da produção
brasileira



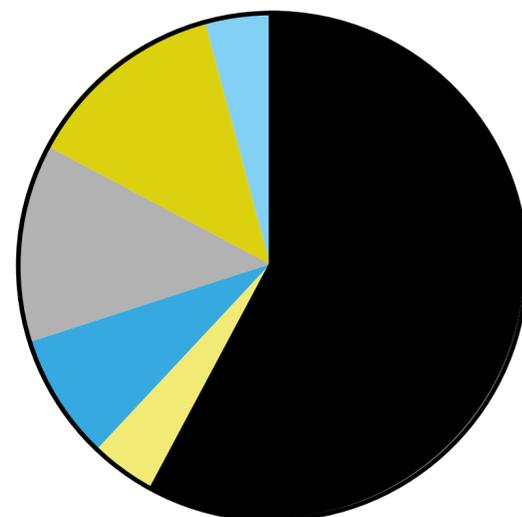
10%
da produção
mundial

FIGURA 4

Evolução da matriz elétrica brasileira

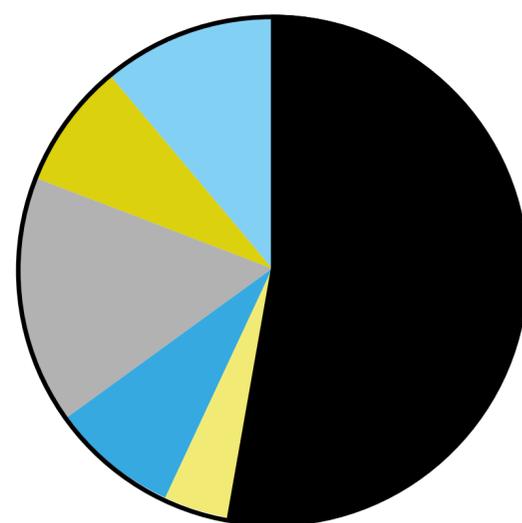
DEZEMBRO 2021

58%	UHE	108 903 MW
4%	PCH	6 830 MW
8%	BIO	14 329 MW
13%	EOL+UFV	24 027 MW
13%	UTE	25 027 MW
4%	MMGD	8 013 MW



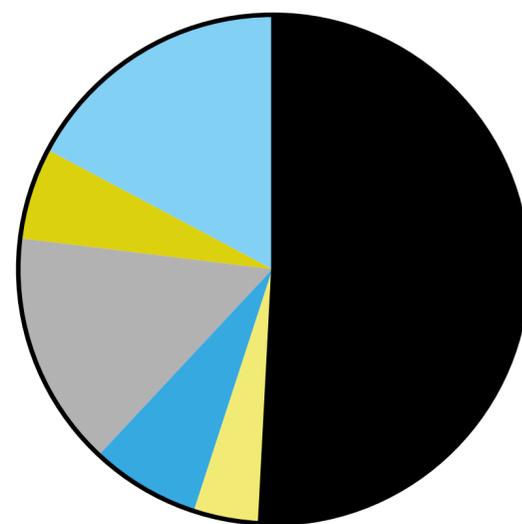
DEZEMBRO 2026

53%	UHE	109 157 MW
4%	PCH	7 465 MW
7%	BIO	15 296 MW
16%	EOL+UFV	33 465 MW
8%	UTE	16 330 MW
11%	MMGD	22 909 MW



DEZEMBRO 2031

51%	UHE	109 157 MW
4%	PCH	7 465 MW
7%	BIO	15 171 MW
15%	EOL+UFV	32 589 MW
6%	UTE	13 613 MW
11%	MMGD	37 218 MW



UHE
Usina Hidrelétrica

BIO
Bioenergia

UTE
Usina Termelétrica

PCH
Pequena Central
Hidrelétrica

EOL+UFV:
Usina Eólica + Central
Geradora Fotovoltaica

MMGD
Micro e Minigeração
Distribuída

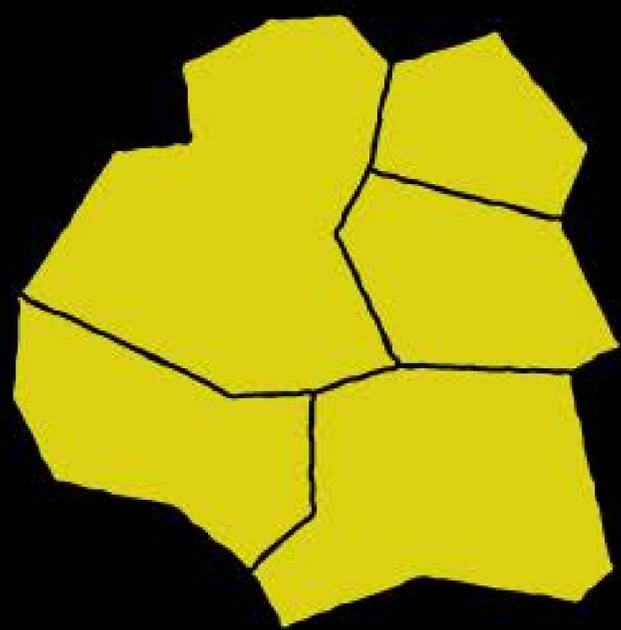
Fonte: MME. (2022)

Assim como as hidrelétricas, as energias renováveis têm como “combustível” as variáveis climáticas e, portanto, são mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica. Como mostrado na Figura 4, o Brasil vem aumentando a participação de geração renovável intermitente em sua matriz elétrica, e, com isso, cresce a vulnerabilidade do sistema, uma vez que a geração renovável introduz incertezas produzidas pelas variáveis climáticas em seu despacho. A utilização desta geração é o procedimento correto a ser adotado, já que contribui para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis nas usinas termelétricas. A diminuição máxima possível das emissões é um imperativo e deve ser uma diretriz norteadora de todos os segmentos da sociedade diante da urgência imposta pelas mudanças climáticas, e é imprescindível a adoção de ações concretas que contribuam para limitar o aquecimento global.

Para lidar com a intermitência das fontes renováveis, existem hoje soluções tecnológicas que possibilitarão a descarbonização do setor e o uso de termelétricas fósseis apenas em situações emergenciais e transitórias, permitindo que o país exerça um papel de liderança na geopolítica global no que diz respeito à estratégia mundial de redução de gases do efeito estufa.



3



**A NECESSIDADE
DE QUANTIFICAR A
AMEAÇA CLIMÁTICA**



Para que o governo tome medidas que tornem o sistema elétrico menos vulnerável, é necessário quantificar o risco potencial relacionado à mudança do clima. Compreender a variabilidade climática, suas causas, impactos potenciais e, sobretudo, sua previsibilidade, são o objetivo de uma parcela significativa da comunidade científica dedicada às ciências ambientais. Existem uma série de modelos que buscam, por meio do desenvolvimento de cenários, projetar os efeitos da mudança do clima na sociedade humana. Na prática, a concretização desses panoramas é diretamente proporcional à implementação ou não de rigorosas políticas climáticas.

No mundo todo, muitas instituições desenvolveram modelos climáticos, com variações na configuração destes diferentes modelos causando diferenças nas simulações da variabilidade e das mudanças climáticas. Apesar disso, é fundamental destacar que os modelos climáticos são ferramentas importantes para a realização de estudos que nos levam a uma melhor compreensão do sistema climático e podem fornecer simulações e projeções úteis do clima futuro para diferentes regiões do mundo, permitindo, portanto, a adoção de medidas de adaptação que diminuirão os impactos sob a sociedade. O mais adequado para nortear políticas públicas é ser estatisticamente mais conservador e fazer uso de um conjunto de modelos para que se possa trabalhar com a média deles. Dessa maneira é possível identificar a tendência para regiões estratégicas no que diz respeito, por exemplo, à geração de energia.

Globalmente, as projeções sugerem que muitas regiões do mundo experimentarão eventos de secas mais frequentes/severas e de chuvas fortes como consequência do aumento das emissões

Para o Brasil, as projeções indicam que as tendências de aumento de temperatura observadas no país devem continuar ao longo do século 21 a uma taxa superior à média global.

Projeta-se que a maioria das regiões brasileiras experimentarão um aumento de pelo menos

+4°C

nas temperaturas médias.

de GEE. Para o Brasil, as projeções indicam que as tendências de aumento de temperatura observadas no país devem continuar ao longo do século 21 a uma taxa superior à média global. Diante de um cenário de alta emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), projeta-se que a maioria das regiões brasileiras experimentarão um aumento de pelo menos 4°C nas temperaturas médias. Há projeções de mudança nos valores médios de precipitação, nas características das estações chuvosas e em frequência e intensidade de eventos extremos ao longo do século 21.

As projeções mostram, para meados e finais do século 21, aumentos nas chuvas nas regiões Sul, Sudeste, Noroeste da Amazônia e leste do Nordeste na forma de eventos de chuva intensa, assim como uma tendência de redução de chuvas nos leste da Amazônia, sul da Amazônia e no semiárido do Nordeste, aumentando o risco de secas e afetando as seguranças hídrica, alimentar e energética em todo o país (Perez et al., 2020).

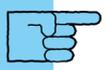
O Brasil vem trabalhando para quantificar as ameaças das mudanças climáticas ao setor elétrico já há duas décadas. Projeções apontam uma redução das vazões das usinas localizadas nas regiões Norte e Nordeste, enquanto para as usinas situadas no Sul e em parte do Sudeste, incluindo a bacia do Paraná, a tendência é de aumento das vazões (Neto, da Paz, Marengo, & Chou, 2016), (Silveira, Filho, Junior, Junior, & Cabral, 2018) e (Lima, Colischonn, & Marengo, 2014). Como a bacia do Paraná está numa região de transição climática, os modelos climáticos têm baixa destreza em simular o clima e, portanto, não há confiabilidade em afirmar se haverá aumento ou diminuição média de precipitação.

Apesar de já haver uma preocupação do poder público e a incorporação de cenários no processo de

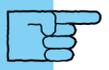
planejamento do setor elétrico, não existem ações concretas suficientes e nem o desenvolvimento de políticas públicas necessárias para lidar com a magnitude do problema. É importante esclarecer que, se o planejamento para o setor não considera adequadamente a dinâmica das alterações do clima, todo o planejamento do sistema de geração de energia fica vulnerável e comprometido, pois é projetado para trabalhar com as séries históricas ou sintéticas estacionárias, na qual se espera uma precipitação média que não irá ocorrer, o que

AS PREVISÕES SÃO ALARMANTES

Tendências apontam para um aumento de temperatura acima da taxa média global, com possíveis consequências como:



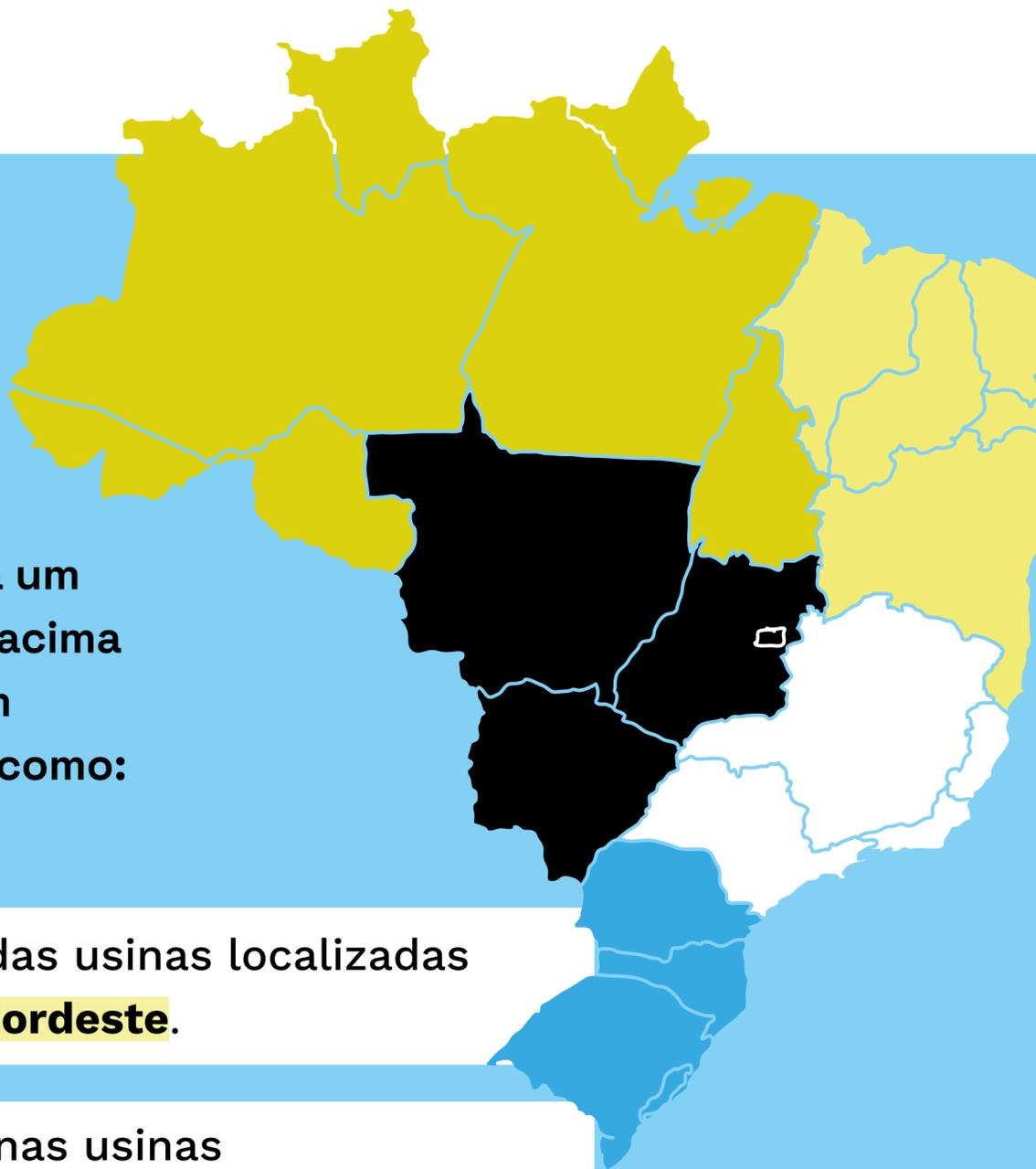
Redução das vazões das usinas localizadas nas regiões **Norte** e **Nordeste**.



Aumento das vazões nas usinas no **Sul** e em parte do **Sudeste**.



Incertezas na bacia do Paraná por conta da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), onde os modelos climáticos divergem quanto a aumento ou diminuição da precipitação.



pode implicar necessidade de geração adicional em curto espaço de tempo para evitar racionamento.

Um exemplo recente foram as medidas adotadas para o setor elétrico em 2021, quando, correndo o risco político de lidar com racionamento de energia devido à crise hídrica, os poderes Legislativo e Executivo adotaram uma série de ações que obrigaram a sociedade a ter mais fontes fósseis de energia na matriz a preços estratosféricos, sob a justificativa de obtenção de mais oferta a qualquer custo. Nesse contexto destacam-se as usinas termelétricas majoritariamente movidas a gás natural contratadas de maneira emergencial. As medidas pelo lado da demanda, que poderiam levar a uma racionalização massiva e coordenada do consumo, praticamente não foram exploradas.

INFLUÊNCIA DA CRESCENTE DEMANDA POR ÁGUA DE OUTROS SETORES ECONÔMICOS

Outro ponto importante quando se quer determinar o efeito das mudanças climáticas nas vazões é o efeito no uso do solo e nos usos consuntivos². Na realidade, a cobertura do solo se retroalimenta com a disponibilidade de água e com as condições climáticas. É importante pontuar que existe uma diminuição da superfície coberta com água no Brasil de 15,7% desde o início dos anos 90 (MapBiomas). Da mesma forma, o uso consuntivo, principalmente para a agricultura, é muito influenciado pelas mudanças climáticas. Elas geram impactos diretos e indiretos sobre as demandas de água, principalmente em usos nos quais o seu consumo se dá diretamente pelas condições

² O uso consuntivo da água é aquele que retira a água de sua fonte natural, diminuindo suas disponibilidades espacial e temporal.

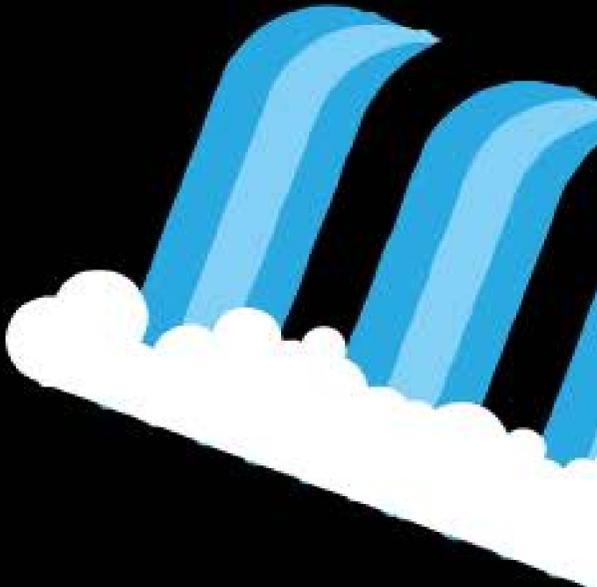
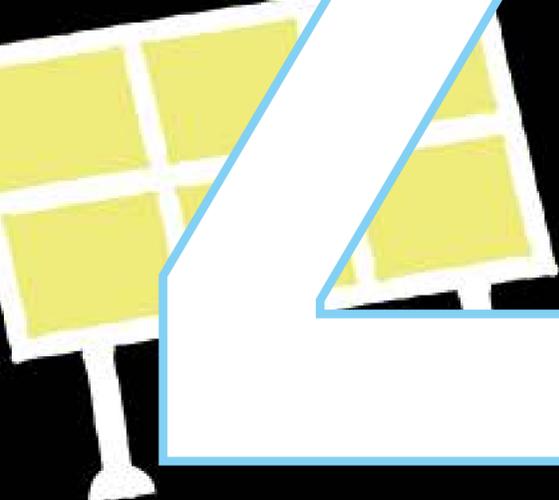
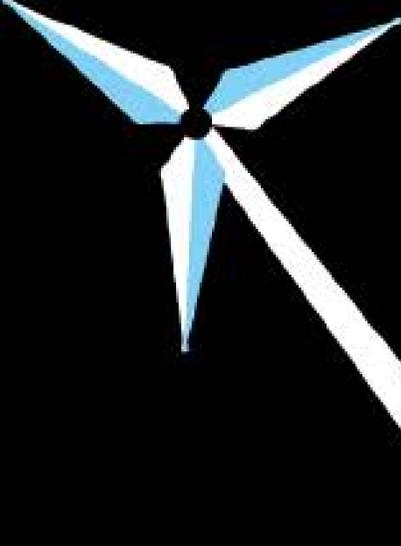
climáticas, como no caso da irrigação de culturas agrícolas. Apesar disso, as estimativas de demanda de água, realizadas por estudos ligados ao planejamento de recursos hídricos e energia, não consideram mudanças nas condições climáticas, mas apenas cenários econômicos de desenvolvimento.

A localização geográfica, a integração do sistema de transmissão e as características individuais das usinas hidrelétricas estão diretamente relacionadas com a intensidade dos impactos que o sistema irá receber. A princípio, quanto maior a interconexão do sistema, melhor sua capacidade de contornar algum problema que venha a surgir a partir da compensação permitida pelas diferentes variações regionais, principalmente no caso de países de grandes extensões, como o Brasil.

Um outro ponto importante é que a geração de energia elétrica distribuída tem evoluído fazendo com que haja maior independência individual ou regional das redes de transmissão e distribuição. Um sistema mais distribuído tende a ser mais resiliente aos eventos extremos por poder contar com produção local de energia.

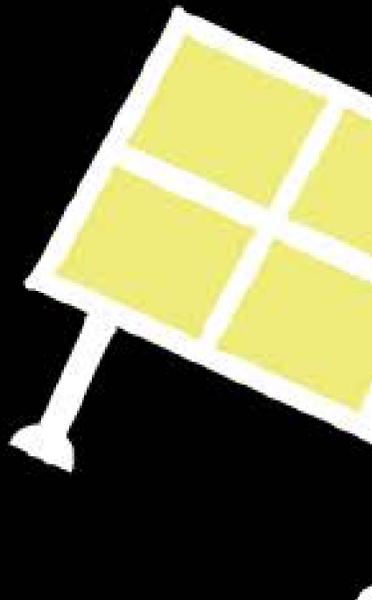
As possíveis soluções para minimizar futuras crises hídricas e energéticas devem ser parte da transição energética do Brasil e do cumprimento dos compromissos junto ao Acordo de Paris. O país tem todas as condições de estar na vanguarda do movimento global de redução de emissões de gases de efeito estufa a partir da oferta de energia limpa e acessível.

O país tem todas as condições de estar na vanguarda do movimento global de redução de emissões de gases de efeito estufa.



4

**VULNERABILIDADE
E RESILIÊNCIA DO
SETOR ELÉTRICO
BRASILEIRO FRENTE
ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS**



A avaliação da vulnerabilidade passa a ser um conceito central para se compreender os impactos das mudanças climáticas e dos desastres naturais no desenvolvimento de estratégias apropriadas de gerenciamento de riscos (Kaiser, 2007). Esta definição difere do conceito tradicional relacionado à confiabilidade do sistema, vigente no setor elétrico.

O grau de vulnerabilidade de um sistema é produto da ameaça *versus* a fragilidade do mesmo. Por outro lado, a fragilidade do sistema é medida em função da sua capacidade de enfrentamento da possível ameaça, sendo, portanto, o inverso da resiliência. Um sistema é mais resiliente quanto mais estiver preparado para enfrentar uma ameaça. É importante observar que resiliência não é só resistência, mas também adaptabilidade, poder de transformação, ou mesmo capacidade de absorção. Atualmente tem se dado mais ênfase a sistemas com capacidade de adaptação para enfrentar eventos extremos do que propriamente em dimensioná-los para resistir à ameaça.

Pode-se afirmar, portanto, que a mudança climática é uma ameaça ao setor elétrico brasileiro cujo planejamento é projetado sob o histórico de variáveis climáticas que estão sofrendo alterações no comportamento. A partir da análise das ameaças e as suas possibilidades de ocorrência, é possível avaliar as ações que deverão ser planejadas para melhorar a resiliência dos sistemas de produção e transporte de energia e de como a matriz energética e elétrica devem

A mudança climática é uma ameaça ao setor elétrico brasileiro cujo planejamento é projetado sob o histórico de variáveis climáticas que estão sofrendo alterações no comportamento.

estar estruturadas para que os sistemas energéticos sejam mais resilientes.

É importante observar que não existe um manual consagrado para o enfrentamento das ameaças climáticas, mas algumas diretrizes podem ser elaboradas para adequar e adaptar os sistemas energéticos.

Antecedentes

Desenvolvimento de metodologia para o dimensionamento das ameaças climáticas às quais estão sujeitas as usinas, com o consequente cálculo das vulnerabilidades tanto do ponto de vista local (do empreendimento propriamente dito) como sistêmico (da energia global gerada pelo sistema).

Estruturação do plano propriamente dito

Com base na metodologia para dimensionamento das ameaças, estruturar um plano de resiliência.

A partir da análise dos vários modelos globais e regionais de projeção das variáveis climáticas, é possível traçar as mudanças prováveis e enumerar possíveis tendências no setor energético. Com as tendências climáticas, os planejadores e formuladores de políticas energéticas devem testar alternativas para adaptação, utilizando novas tecnologias de geração, além de incluí-las no processo de construção de cenários. É importante o desenvolvimento de sistemas energéticos mais robustos e menos vulneráveis, necessidade que já vem sendo observada nos últimos anos em função de uma sequência de anomalias negativas de precipitação no Brasil.

A diversidade é um aspecto importante para os sistemas socioeconômicos. Promover a diversidade nos sistemas de energia, tanto em termos

de produção de energia quanto de tipos de consumo de energia, aumenta a resiliência desses sistemas. Isso pode ser alcançado em termos de promoção da diversidade tecnológica, quando os fornecimentos tradicionais de energia (petróleo, gás natural, carvão, energia nuclear e hidrelétrica) são complementados com novas tecnologias de geração de energia, a maioria relacionada a fontes de energia renováveis.

Esses novos tipos de tecnologias incluem tecnologias expansivas de energia solar, eólica, geotérmica, de biomassa e de energia oceânica para geração de energia. A medida da diversidade pode, assim, ser uma boa avaliação da resiliência.

Groisman, et al. (2005) argumentam que a diversidade pode ser vista como abrangendo três propriedades: variedade, equilíbrio e disparidade. A variedade refere-se a categorias disponíveis, como, no caso de geração de energia, fontes distintas de energia (carvão, gás natural, nuclear, eólica, solar etc.). O equilíbrio é em referência ao rateio de energia entre as categorias disponíveis, ou seja: quanto mais distribuída, maior a diversidade. A disparidade refere-se ao grau em que as próprias categorias podem ser diferenciadas umas das outras.

Promover a diversidade nos sistemas de energia, tanto em termos de produção de energia quanto de tipos de consumo de energia, aumenta a resiliência desses sistemas.



5

PRINCIPAIS
AÇÕES

Fica evidente que quando falamos de clima e das projeções futuras diante das mudanças climáticas sempre existem incertezas. Apesar disso, o poder público pode se preparar para minimizar os impactos devastadores desse fenômeno tornando os sistemas mais adaptados para enfrentar essa realidade. É possível tornar o sistema elétrico mais resiliente a partir do mapeamento de suas vulnerabilidades. Posteriormente, é necessário traçar um plano de resiliência e adaptação para o setor, com ações concretas que visam minimizar os impactos das mudanças climáticas na geração e na distribuição de energia.

Neste sentido, a diminuição das precipitações das regiões Norte e Nordeste projetadas pelos modelos climáticos não recomenda a implantação de novas centrais hidrelétricas, principalmente se forem usinas a fio d'água, visto que não se conseguirá regularizar as vazões, minimizando o poder de amenizar a intensificação da sazonalidade. Esse é o caso do complexo de usinas no rio Tapajós, que está sendo previsto para depois de 2030 pelo MME e que deve ser reavaliado à luz de outros modelos climáticos regionais.

No caso de fontes renováveis como eólica e solar, os modelos mostram um incremento nos ventos e na radiação para a região Nordeste, o que indica que esta localidade deve ser um grande exportador de energia renovável. Este aumento deve ser acompanhado de perto pelos investidores destas usinas para dimensionamento ótimo das capacidades a serem instaladas. Além disso, é fundamental que o Estado brasileiro esteja preparado para orientar a disseminação dessas plantas no território de modo a não replicar um modelo historicamente adotado para o setor, no qual os Povos

1

A diminuição das precipitações esperadas nos Norte e Nordeste **não recomenda a implantação de novas centrais hidrelétricas**, principalmente se forem usinas a fio d'água. É o caso do complexo de usinas no rio Tapajós, previsto para depois de 2030, que precisa ser reavaliado à luz das projeções climáticas.

2

Já o **incremento nos ventos e na radiação solar projetado para o Nordeste** sugere que esta região deverá ser uma grande exportadora de energia renovável.

3

Sistemas distribuídos tendem a ser mais resilientes a eventos climáticos extremos: **soluções locais como a instalação de baterias em residências, junto com geração fotovoltaica, podem minimizar os efeitos adversos do clima.**

4

Com a diversificação da matriz, especialmente a partir de fontes renováveis, e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento como baterias, hidrogênio verde e usinas hidrelétricas reversíveis para lidar com situações de estresse climático, **o acréscimo de novas termelétricas fósseis à matriz deve se dar somente em caráter emergencial e temporário.**

Indígenas e Comunidades Tradicionais são invariavelmente violados na garantia de seu direito territorial. O processo de aprovação e licenciamento dessas usinas deve assegurar a aplicação de salvaguardas que garantam os direitos territoriais e a consulta livre prévia e informada aos Povos Indígenas e Comunidades Tradicionais.

Nas regiões Sudeste e Centro-oeste, deve-se buscar cada vez mais uma melhor análise das variáveis hidroclimáticas. Os novos conjuntos de modelos do CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*)³ disponibilizados em 2021 ainda estão passando por um processo de regionalização dinâmica para que se possa disponibilizar resultados mais precisos. A partir desses resultados será possível avaliar se as tendências projetadas continuam indicando os mesmos resultados de conjuntos de modelos anteriores em cada bacia do Sistema Interligado Nacional (SIN). No entanto, é necessário rever a operação atual das bacias dessas regiões para manter os níveis de volume útil em torno de 70%, dependendo das características de cada usina.

Com as mudanças climáticas, aumenta a dificuldade das previsões das variáveis relacionadas ao clima e, conseqüentemente, o risco de déficit de energia. Pode haver uma necessidade de se ter uma

O processo de aprovação e licenciamento dessas usinas deve assegurar a aplicação de salvaguardas que garantam os direitos territoriais e a consulta livre prévia e informada aos Povos Indígenas e Comunidades Tradicionais.

³ O *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) é o conjunto de modelos globais utilizado nas análises de mudanças climáticas do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e tem como nova metodologia a utilização de níveis de aquecimento ao invés dos cenários de forçantes radiativas (RCPs).

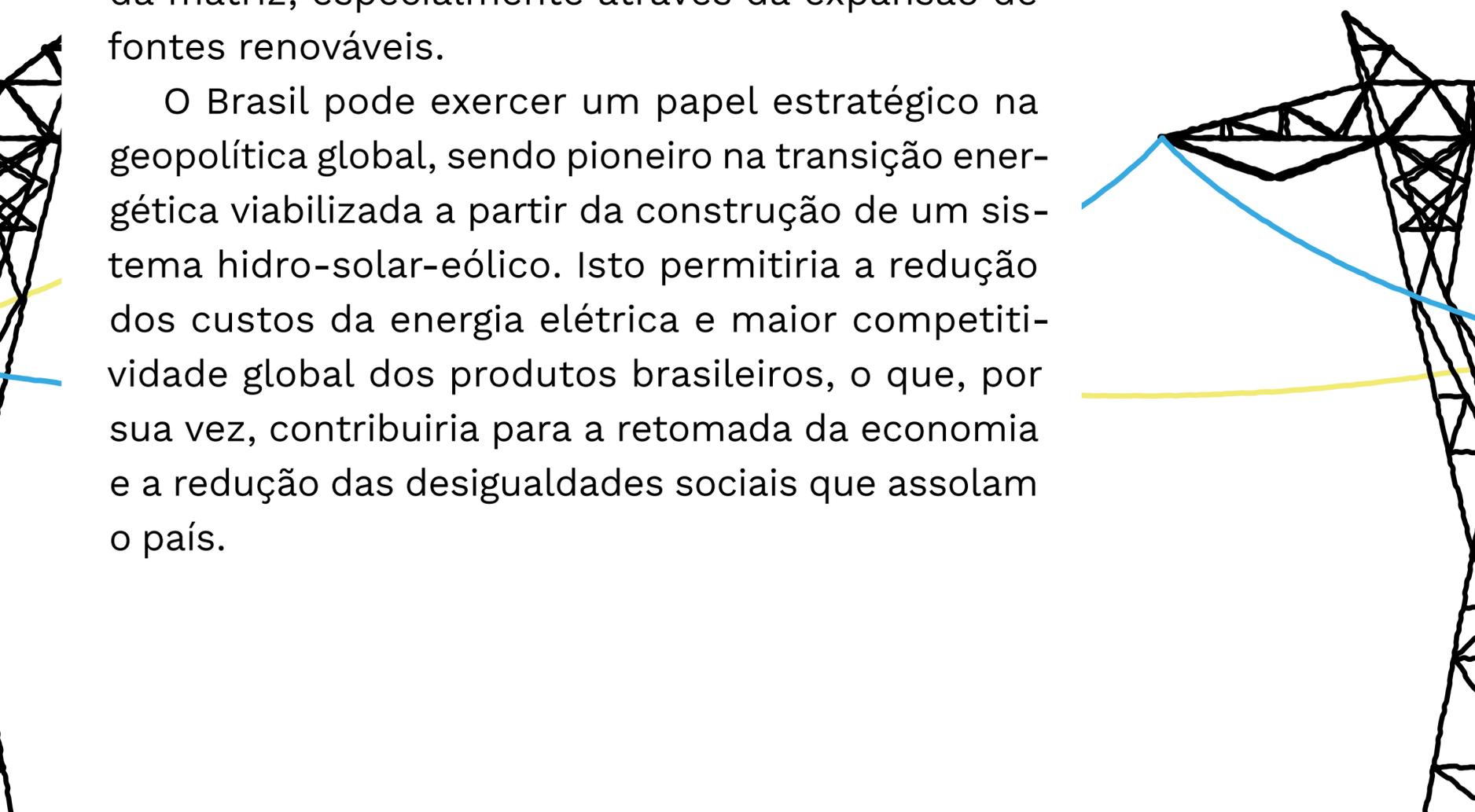
maior reserva de potência para o curto prazo, e uma maior capacidade de armazenamento de energia em médio e longo prazos para enfrentar estações com menores precipitações e com aumento de temperatura que ocasiona maior consumo de energia. Uma alternativa adicional para enfrentar a ameaça climática seria dispor de tecnologias de armazenamento como baterias, hidrogênio verde, usinas hidrelétricas reversíveis etc., pois, conforme mostrado neste trabalho, haverá um maior estresse climático e o sistema energético deve estar preparado para enfrentá-lo. É importante o desenvolvimento de políticas públicas e o investimento em pesquisa para viabilizar essas tecnologias.

Um outro movimento atual é a descentralização do setor elétrico por meio da geração distribuída e do empoderamento do consumidor, que passa a dispor de tecnologias de informação para controle do seu consumo. Sistemas distribuídos tendem a ser mais resilientes a eventos extremos, visto que dispõem localmente de seus próprios recursos para recomposição. A busca de soluções locais como, por exemplo, a instalação de baterias em residências junto com geração fotovoltaica, pode minimizar os efeitos dos eventos extremos.

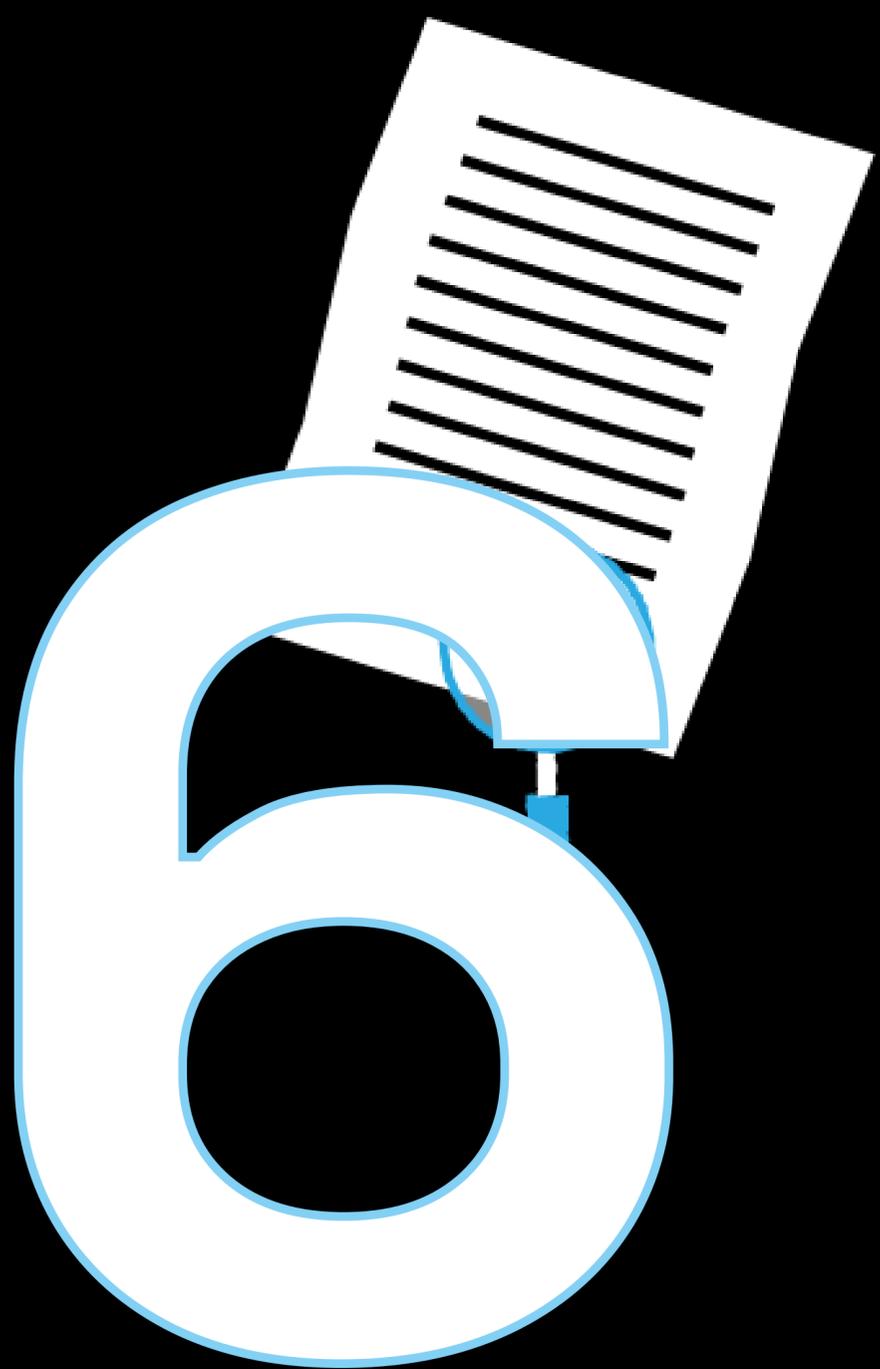
O cumprimento dos compromissos junto ao Acordo de Paris vai além da inerente ação de combate ao desmatamento na Amazônia. O país deve ter uma política ambiental ambiciosa e transversal que envolva todos os setores da sociedade na busca pela redução máxima da emissão de gases do efeito estufa. Como signatário desse acordo o Brasil deve resgatar suas metas setoriais de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE), a chamada Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). No que se refere ao setor elétrico brasileiro, é urgente a construção de um plano

de descarbonização com ações de curto e médio prazo que faça parte da transição energética do país. O acréscimo de novas termelétricas fósseis à matriz deve se dar somente em caráter emergencial e temporário. Os investimentos em infraestrutura e o direcionamento das políticas públicas para o setor devem ser orientados para a diversificação da matriz, especialmente através da expansão de fontes renováveis.

O Brasil pode exercer um papel estratégico na geopolítica global, sendo pioneiro na transição energética viabilizada a partir da construção de um sistema hidro-solar-eólico. Isto permitiria a redução dos custos da energia elétrica e maior competitividade global dos produtos brasileiros, o que, por sua vez, contribuiria para a retomada da economia e a redução das desigualdades sociais que assolam o país.



O Brasil pode exercer um papel estratégico na geopolítica global, sendo pioneiro na transição energética viabilizada a partir da construção de um sistema hidro-solar-eólico.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO FRENTE A CRISE CLIMÁTICA

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., . Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111(D5), D05109. Available from <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>.

Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2018). Framing and Context. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péron, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*.

Alvalá RC et al (2017) Drought monitoring in the Brazilian semiarid region, in press, *Annais da Academia Brasileira de Ciências do Brasil*. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>

Agência Nacional de Águas. (2019a). Manual de usos consuntivos de água no Brasil. Agência Nacional de Águas, ANA, Brasília.

Ashfaq, M., Cavazos, T., Reboita, M. S., Torres-Alavez, J. A., Im, E.-S., Olusegun, C. F., Alves, L., Key, K., Adeniyi, M. O., Tall, M., Sylla, M. B., Mehmood, S., Zafar, Q., Das, S., Diallo, I., Coppola, E., & Giorgi, F. (2020). Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations. *Climate Dynamics*. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05306-2>.

Assad, E. D., Oliveira, A. F., Nakai, A. M., Pavão, E., Pellegrino, G., & Monteiro, J. (2016).

Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas. Em Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, *Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil* (pp. 127-). Brasília.

Banco Mundial; Ministério de Minas e Energia. (2018). Projeto META TDR no. 66, Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos. Acesso em 24 de julho de 2020, disponível em www.mme.gov.br: <http://www.mme.gov.br/documents/36144/472561/Produto+6.pdf>

Ban, N., Schmidli, J., & Schäfer, C. (2014). Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 7889_7907. Available from <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>.

Bartsotas, N. S., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Solomos, S., & Kallos, G. (2017). Moving toward subkilometer modeling grid spacings: Impacts on atmospheric and hydrological simulations of extreme flash flood-inducing storms. *Journal of Hydrometeorology*, 18 (1), 209_226. Available from <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0092.1>.

Bayer, D. M. (2014). Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre.

Bayer, D. M., & Collischonn, W. (2013). Análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 165-179.

Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Políticas e

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. In: Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. v. II, Brasília, 2016.

Cavalcanti, I.F.A., A.F. Carril, O.C. Penalba, et al. 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin—review and new results from observations and climate simulations. *J. Hydrol.* 523: 211–230.

Chan, S. C., Steven, C., Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., & Blenkinsop, S. (2016a). Downturn in scaling of UK extreme rainfall with temperature for future hottest days. *Nature Geoscience*, 9(1), 24_28. Available from <https://doi.org/10.1038/ngeo2596>.

Chan, S. C., Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., & Blenkinsop, S. (2016b). The characteristics of summer sub-hourly rainfall over the southern UK in a high-resolution convective permitting model. *Environmental Research Letters*, 11(9), 94024.

Christensen, J. H., Kanikicharla, K. K., Aldrian, E., An, S., Il., Albuquerque Cavalcanti, I. F., de Castro, M., Dong, W., Goswami, P., Hall, A., Kanyanga, J. K., Kitoh, A., Kossin, J., Lau, N. C., Renwick, J., Stephenson, D. B., Xie, S. P., Zhou, T., Abraham, L., Ambrizzi, T., ... Zou, L. (2013). Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In Intergovernmental panel on climate change (Ed.), *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (Vol. 9781107057, pp. 1217_1308). Cambridge: Cambridge University Press. Available from <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.028>.

Climate change 2013: The physical science basis. contribution of work- ing group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (pp. 1029_1136). Cambridge: Cambridge University Press.

Colle, B. A., Garvert, M. F., Wolfe, J. B., Mass, C. F., & Woods, C. P. (2005). The

13_14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part III: Simulated microphysical budgets and sensitivity studies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(10), 3535_3558. Available from <https://doi.org/10.1175/JAS3552.1>.

Colle, B. A., & Mass, C. F. (2000). The 5_9 February 1996 flooding event over the Pacific Northwest: Sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts. *Monthly Weather Review*, 128(3), 593_617. Available from [http://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000](http://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T. G., Krinner, M. S., Tebaldi, C., Weaver, A. J., & Wehner, M. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In T. F. Stocker, G.-K. D. Qin, M. T. Plattner, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.),

Collischonn, W. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Porto Alegre.

Collischonn, W., & Tucci, C. E. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1), 95-118.

Collischonn, W., Buarque, D. C., & Mendes, C. A. (2015). MGB-IPH: I Curso Básico - Descrição teórica do MGB e estrutura geral do MGB-IPH. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília.

Cuartas, L.A.; Cunha, A.P.M.d.A.; Alves, J.A.; Parra, L.M.P.; Deusdará-Leal, K.; Costa, L.C.O.; Molina, R.D.; Amore, D.; Broedel, E.; Seluchi, M.E.; et al. Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water* 2022, 14, 601. <https://doi.org/10.3390/w14040601>

Cunha APMA, Zeri M, Deusdará Leal K, Costa L, Cuartas LA, Marengo JA, Tomasella J, Vieira RM, Barbosa AA, Cunningham C, Cal Garcia

VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO FRENTE A CRISE CLIMÁTICA

JV, Broedel E, Alvalá R, Ribeiro-Neto G (2019) Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere* 10:642–649

Deusdará-Leal, K.; Mohor, G.S.; Cuartas, L.A.; Seluchi, M.E.; Marengo, J.A.; Zhang, R.; Broedel, E.; de Jesus Amore, D.; Alvalá, R.C.S.; Cunha, A.P.M.A.; et al (2022). Trends and Climate Elasticity of Streamflow in South-Eastern Brazil Basins. *Water* 2022, 14, 2245. <https://doi.org/10.3390/w14142245>

Espinoza, J.-C.; Marengo, J. A.; Schongart, J. et al. The New Historical Flood of 2021 in the Amazon River Compared to Major Floods of the 21st Century: Atmospheric Features in the Context of the Intensification of Floods. *Weather and Climate Extremes* 2022, 35. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>.

Felix, V. S., & Da Paz, A. R. (2016). Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(3), 556-569.

Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547_1578. Available from <https://doi.org/10.1002/joc.1556>.

Fundação Getúlio Vargas. (2013). Diagnóstico preliminar das principais informações sobre projeções climáticas e socioeconômicas, impactos e vulnerabilidades disponíveis em trabalhos e projetos dos atores mapeados. Ministério do Meio Ambiente (MMA), São Paulo.

Gentry, M. S., & Lackmann, G. M. (2010). Sensitivity of simulated tropical cyclone structure and intensity to horizontal resolution. *Monthly Weather Review*, 138(3), 688_704. Available from <https://doi.org/10.1175/2009MWR2976.1>.

Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical*

Research: Atmospheres. Available from <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>, p. 2018JD030094.

Giorgi F, Jones C, Asrar G (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull* 175–183

GIZ MME. (2021). Estudo Climático: Análise da Vulnerabilidade de Usinas Hidrelétricas aos Impactos das Mudanças Climáticas. MRTS.

Groisman, P., Knight, R., Easterling, D., Karl, T., Hegerl, G., & Razuvaev, V. (2005). Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *Journal of Climate - J CLIMATE*, 18, 1326-1350. doi:10.1175/JCLI3339.1

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). Home>População>Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. Acesso em 10 de Outubro de 2020, disponível em www.ibge.gov.br: <https://www.ibge.gov.br/apps//populacao/projecao/>

IPCC. (2007b). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Jimenez JHC et al (2019) The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over

Amazon forests and the Northeast Brazil region, *Int J Climatol.* 2019;1–20.

Kaiser, G. (2007). Coastal vulnerability to climate change and natural hazards. 8th Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change. Karlsruhe: Karlsruhe University.

Kendon, E. J., Roberts, N. M., Senior, C. A., & Roberts, M. J. (2012). Realism of rainfall in a very high-resolution regional climate model. *Journal of Climate*, 25(17), 5791_5806. Available from <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00562.1>.

Kendon, E. J., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., & Senior, C. A. (2014). Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change*, 4(7), 570_576. Available from <https://doi.org/10.1038/nclimate2258>.

Kendon, E. J., Stratton, R. A., Tucker, S., Marsham, J. H., Berthou, S., Rowell, D. P., & Senior, C. A. (2019). Enhanced future changes in wet and dry extremes over Africa at convection-permitting scale. *Nature Communications*, 10(1), 1794. Available from <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09776-9>.

Kharrazi, A., Sato, M., Yarime, M., Nakayama, H., Yu, Y., & Kraines, S. (2015). Examining the resilience of national energy systems: Measurements of diversity in production-based and consumption-based electricity in the globalization of trade networks. *Energy Policy*, 87, 455-464. doi:10.1016/j.enpol.2015.09.019

Lima, J. W., Colischonn, W., & Marengo, J. A. (2014). Efeito das mudanças climáticas na geração de energia elétrica (1 ed.). São Paulo: Hunter Books.

Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., Barlage, M., Newman, A. J., Prein, A. F., Chen, F., Chen, L., Clark, M., Dai, A., Dudhia, J., Eidhammer, T., Gochis, D., Gutmann, E., Kurkute, S., Li, Y., Thompson, G., & Yates, D. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America.

Climate Dynamics, 49(1_2), 71_95. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3327-9>.

LUCENA, A. F. P. et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 879-889, 2009.

MARENGO, J. A. et al. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change*, v. 98, n. 3-4, p. 509-529, 2010.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta Cptec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late XXI Century: intercomparison of scenarios from three regional climate models (2009) *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-009-0721-6, v. 10.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP. São Paulo*, n. 106, p. 31-44 julho/agosto/setembro 2015.

Marengo JA, Alves LM, Alvala RCS et al (2017) Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *An Acad Bras Cienc.* <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

Marengo, J.A.; Cunha, A. P.; Cuartas, L. A. et al. (2021) Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Front. Water* 2021, 3, 639204. doi: 10.3389/frwa.2021.639204.

Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D.,

VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO FRENTE A CRISE CLIMÁTICA

Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Wattersson, I. G., Weaver, A. J., Zhao, Z. C., & IPCC. (2007) Global climate projections, In Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, In Nature (Vol. 446). Available from <https://doi.org/10.1038/446727a>.

Ministério de Minas e Energia. (2017). Revisão ordinária de Garantia Física de energia das usinas hidrelétricas - UHEs despachadas centralizadamente no Sistema Interligado Nacional - SIN. Ministério de Minas e Energia, MME, Brasília.

Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. (2022). Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Brasília: MME/EPE.

Modarres, R., 2007: Streamflow drought time series forecasting. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 21: 223–233. DOI: 10.1007/s00477-006-0058-1.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463(7282), 747_756. Available from <https://doi.org/10.1038/nature08823>.

Naumann, G.; Podestá., G.; Marengo, J. et al. El Episodio de Sequía Extrema de 2019–2021 en la Cuenca del Plata, EUR 30833 ES, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea: Luxemburgo, 2022, doi:10.2760/346183.

Neto, A. R., da Paz, A. R., Marengo, J. A., & Chou, S. C. (2016). Hydrological processes and climate change in hydrographic regions of Brazil. Journal of Water Resource and Protection, 8, 1103-1127.

Oliveira M.J., Carneiro C.D.R., Vecchia F.A.S., Baptista G.M.M. 2017. Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima.

Terræ Didática, 13(3):149-184. <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>

Perez L, et al (2020) Climate change and disasters: analysis of the Brazilian regional inequality/Mudanças climáticas e desastres: análise da desigualdade regional brasileira, Sustainability in Debate - Brasília, v. 11, n.3, p. 260-277, dez/2020

Prein, A. F., Gobiet, A., Suklitsch, M., Truhetz, H., Awan, N. K., Keuler, K., & Georgievski, G. (2013). Added value of convection permitting seasonal simulations. Climate Dynamics, 41 (9_10), 2655_2677. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1744-6>.

Projeto MapBiomass – Mapeamento da superfície de água no Brasil (Coleção 1), acessado em 13 de março de 2023 através do link: [A DINÂMICA DA SUPERFÍCIE DE ÁGUA DO TERRITÓRIO BRASILEIRO](#)

QUEIROZ, A. R. et al. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. Renewable Energy, v. 99, p. 379-389, 2016.

Reboita, M.S.; da Rocha, R.P.; Souza, C.A.d.; Baldoni, T.C.; Silva, P.L.L.d.S.; Ferreira, G.W.S. Future Projections of Extreme Precipitation Climate Indices over South America Based on CORDEX-CORE Multimodel Ensemble. Atmosphere 2022, 13, 1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>

Ranz, Ubel, Arkus, & Ottek (2010). Observed and projected climate shifts 1901 – 2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification.

Rusticucci, M. 2012. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. Atmos. Res. 106: 1–17.

Santos, D., Pedra, G., Silva, M., Guimarães Junior, C., Alves, L., Sampaio, G., & Marengo, J. (2020). Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5oC, 2oC and 4oC. Sustentabilidade em Debate, 11, 57-90. doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933.

VULNERABILIDADE DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO FRENTE A CRISE CLIMÁTICA

SCHAEFFER, R. et al. Energy sector vulnerability to climate change: a review. *Energy*, v. 38, n. 1, p. 1-12, 2012.

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013a). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1716_1733. Available from <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>.

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013b). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6), 2473_2493. Available from <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>.

Silva, M.E.S., G. Pereira & R.P. da Rocha. 2016. Local and remote climatic impacts due to land use degradation in the Amazon “Arco f Deforestation”. *Theor. Appl. Climatol.* 125: 609– 623.

Silveira, C. d., Filho, F. d., Junior, F. d., Junior, L. M., & Cabral, S. L. (2018). Mudanças climáticas e o setor hidroelétrico brasileiro: uma análise com base em modelos do IPCC-AR5. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, 47, 46-60.

SKANSI MM ET AL. 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Glob Planet Change* 100:295-307.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485_498. Available from <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Telesca, L., M. Lovallo, I. Lopez-Moreno and S. Vicente-Serrano, 2012: Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index time series in the Ebro Basin (Spain). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(4): 1662–1678. DOI: 10.1016/j.physa.2011.10.023.

Trimble, S. W., Weirich, F. H., & Hoag, B. L. (1987). Reforestation and reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. *Water Resources Research*, 23(3), 425- 437.

UNDP. (2014). Human Development Report 2014. Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience. United Nations Development Programme, New York, NY.

UNEP. (2002). Assessing Human Vulnerability to Environmental Change: Concepts, Issues, Methods and Case Studies. . UNEP/DEWA/RS.03-5, Nairobi.

Vasquez-Arroyo, E, Gandelman DA, da Silva F, Magalar L, Santos DV, Lucena AFP (2020) Implications of climate change impacts for the Brazilian electricity mix / Implicações dos impactos das mudanças climáticas na matriz elétrica brasileira, *Sustainability in Debate - Brasília*, v. 11, n.3, p. 5-7, dez/2020

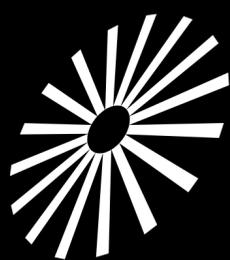
Viola, M. R., Mello, C. R., Chou, S. C., Yanagi, S. N., & Gomes, J. L. (2014). Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 35, 1054-1068.

Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E., & Dickinson, R. E. (2012). How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? *Climate Dynamics*, 41 (11), 3127_3143. Available from <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y>.

Zanin, M., Tessarolo, G., Machado, N., & Albernaz, A. L. (2016). Mudanças climáticas e a cobertura vegetal nativa: impactos em um país megadiverso e seus biomas. Em *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil* (pp. 93-125). Brasília.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851_870. Available from <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.

REALIZAÇÃO



**COALIZÃO
ENERGIA
LIMPA**

transição justa
e livre do gás

ORGANIZAÇÃO

climainfo

APOIO



iema
Instituto de Energia
e Meio Ambiente

ARAYARA
.org



Inesc

idec

Instituto Brasileiro de
Defesa do Consumidor

InstitutoPólis



iCS
instituto
CLIMA e SOCIEDADE