

Os *White Papers* do Instituto Acende Brasil consolidam análises e recomendações aprofundadas sobre temas do Setor Elétrico Brasileiro e visam à promoção de discussões qualificadas sobre as seguintes dimensões setoriais: Agência Reguladora, Governança Corporativa, Impostos e Encargos, Leilões de Energia e Transmissão, Meio Ambiente e Sociedade, Oferta de Energia, Rentabilidade, Tarifa e Regulação. Para saber mais sobre o Instituto Acende Brasil acesse www.acendebrasil.com.br

ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO PARA EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

Os efeitos das mudanças climáticas e os impactos de eventos extremos ao redor do mundo têm ganhado espaço nas manchetes nos últimos anos e as previsões feitas pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática) afirmam que o cenário tende a se agravar. Com a janela de ação para combater o aquecimento global se fechando cada vez mais rapidamente, torna-se fundamental assegurar o cumprimento das metas globais para redução de emissões de GEEs (Gases de Efeito Estufa), assim como elaborar planos de adaptação para os desafios futuros, que certamente virão.

O mundo vive hoje uma transição energética de fontes baseadas em combustíveis fósseis para fontes renováveis. O setor elétrico global está fortemente associado às questões climáticas, seja pela sua relevância nas emissões de GEEs na produção e uso de energia, seja pela sua vulnerabilidade às alterações do clima.

Mas a realidade brasileira é diferente de boa parte do mundo, pois o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) é hoje responsável por apenas 2,4% das emissões totais de GEEs no país, uma vez que a matriz elétrica nacional conta com mais de 80% de participação de fontes renováveis.

Ironicamente, esse alto grau de renovabilidade que é observado na matriz elétrica brasileira aumenta a nossa vulnerabilidade diante

dos eventos climáticos extremos. Portanto, as políticas e as discussões climáticas serão determinantes para o planejamento energético mundial e nacional, sendo que o setor global de energia elétrica enfrentará um duplo desafio nas próximas décadas: (1) ser transformado em um sistema de baixo carbono; e (2) adaptar-se às mudanças climáticas e seus efeitos para garantir que o fornecimento de eletricidade permaneça seguro e confiável.

Com base no contexto acima, este *White Paper*: (a) explora a vulnerabilidade do setor elétrico diante dos eventos climáticos extremos previstos, inclusive considerando as propostas de adaptação que podem ser implementadas para conferir maior resiliência ao SEB; e (b) descreve as estratégias rumo à meta global net zero, com seus desafios e oportunidades, incluindo os desdobramentos do processo de descarbonização por meio da precificação do carbono.

“It is neither the strongest nor the most intelligent of the species that survives. It is the one that is the most adaptable to change.”

“Não é o mais forte nem o mais inteligente que sobrevive, mas o que melhor se adapta às mudanças”

(Charles Darwin, naturalista inglês que formulou a teoria da evolução das espécies)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2	4.3 Propostas de soluções adaptativas	18
2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS ACORDOS INTERNACIONAIS.....	3	5 RUMO À DESCARBONIZAÇÃO.....	26
3 O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	7	5.1. Precificação de carbono.....	26
3.1 Contextualização	7	5.2. “Net zero”	30
3.2 Expansão da matriz e perfil da operação	8	5.3 Desafios globais da descarbonização.....	35
3.3 Emissões de GEEs.....	9	5.4 Desafios e oportunidades nacionais da descarbonização	36
4 RISCOS CLIMÁTICOS	11	6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
4.1 Potenciais impactos	11	7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
4.2. Vulnerabilidades do setor elétrico brasileiro	15		

1 INTRODUÇÃO

Em 2017, o Instituto Acende Brasil publicou o *White Paper* nº 17, cujo objetivo foi contextualizar os setores emissores de gases de efeito estufa (GEEs) diante do Acordo de Paris, compromisso internacional sobre o clima assinado em 2015 do qual o Brasil é signatário. O estudo teve seu foco na discussão do papel do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) em função dos compromissos assumidos pelo governo brasileiro perante a comunidade internacional por meio de uma análise que contemplou o passado e as perspectivas de curto e médio prazo.

Uma das constatações desse estudo foi a baixíssima contribuição do SEB para as emissões de GEEs nacionais em função do alto grau de renovabilidade da matriz elétrica brasileira, característica presente à época do estudo e que persiste até hoje.

Este *White Paper* nº 29: (a) atualizou algumas informações apresentadas no *White Paper* Nº 17 relativas à capacidade instalada do SEB e às estimativas de emissões de GEE oriundas dele; (b) explorou a temática da vulnerabilidade do setor às mudanças climáticas e a eventos extremos previstos para os próximos anos, inclusive considerando as propostas de adaptação que podem ser implementadas para conferir maior resiliência ao SEB; e (c) abordou o conceito de *net zero* e os desdobramentos do processo de descarbonização por meio da precificação do carbono.

Este documento está organizado em seis seções, incluindo esta Introdução. Na seção 2 apresentam-se as últimas atualizações trazidas pelo relatório AR6 (*Assessment Report 6*) do IPCC e os encaminhamentos das últimas COPs, assim como os compromissos assumidos pelo Brasil. Na seção 3 é discutido o perfil de emissões de GEEs do Brasil e do mundo e o papel do segmento de geração de energia elétrica nacional. A seção 4 descreve os riscos climáticos e potenciais impactos das mudanças do clima no sistema de geração e transmissão/distribuição de energia no mundo, bem como a vulnerabilidade do SEB e as propostas de soluções adaptativas. A seção 5 descreve as estratégias rumo ao processo global de descarbonização, com a meta de *net zero* e as oportunidades e desafios. A seção 6 apresenta conclusões e recomendações.

2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS ACORDOS INTERNACIONAIS

Os efeitos das mudanças climáticas e os impactos de eventos extremos ao redor do mundo – como inundações, incêndios, degelo e enchentes – têm ganhado espaço nas manchetes nos últimos anos. E as previsões feitas por especialistas afirmam que o cenário tende a se agravar.

O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática) lançou em 2021 o terceiro e último tomo de seu 6º Relatório de Avaliação (*Assessment Report - AR6*) e, em março de 2023, publicou o Relatório Síntese (IPCC, 2023) que resume o estado de conhecimento acerca das mudanças climáticas, seus impactos e riscos generalizados, assim como medidas de mitigação e adaptação.

De acordo com IPCC (2023), para que a humanidade tenha uma chance de pelo menos 50% de estabilizar o aquecimento global em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (como determina o Acordo de Paris), as emissões globais de gases de efeito estufa precisam atingir seu pico entre 2020 e 2025 e cair 43% até 2030. No entanto, observamos que desde 2010 tais emissões cresceram 12%.

O Observatório do Clima (<https://www.oc.eco.br/publicacoes/>) destacou pontos importantes trazidos pelo 3º tomo do AR6 e que também foram destaque no Relatório Síntese de 2023: (1) a temperatura da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos, pelo menos nos últimos 2000 anos; e (2) apesar de avanços nas ações climáticas de 2010 para cá, a última década teve o maior crescimento de emissões da história humana, com 9,1 bilhões de toneladas a mais do que na década anterior. Tudo isso mesmo com a consciência da escala do problema e da urgência da ação.

A fim de se ter melhor compreensão das análises feitas pelo IPCC, é importante entender os cenários considerados nos relatórios. Cenários de mudanças climáticas são representações de como o futuro pode se desenvolver, com base em um conjunto coerente de suposições sobre parâmetros ou direcionadores principais (*key drivers*), incluindo demografia, processos econômicos, inovação tecnológica, governança, estilos de vida, assim como forças motrizes geofísicas, como emissões de GEEs, aerossóis ou padrões de uso da terra (O'Neill *et al.*, 2014). Cenários não são previsões; são, na verdade, uma investigação no formato “e se” (*what if*) das implicações de vários desenvolvimentos e ações (Moss *et al.*, 2010).

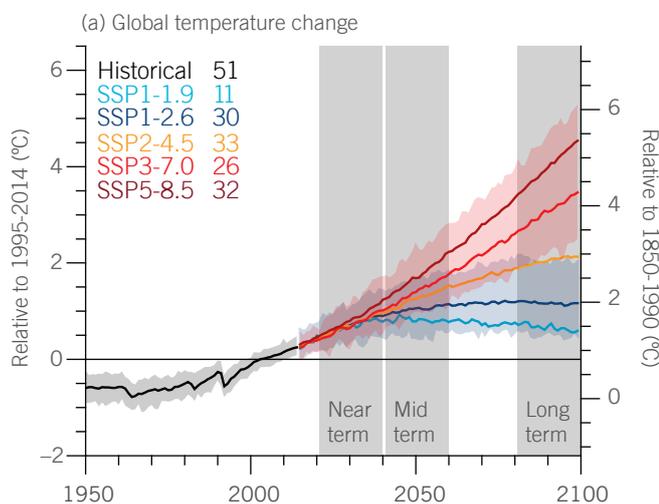
O 5º Relatório do IPCC de 2013 (AR5) introduziu os cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways – Caminhos de Concentração Representativa*), que se referem a diferentes trajetórias de emissões de GEEs. Os cenários baseados em RCP são referidos como RCPy, onde ‘y’ se refere ao nível de forçante radiativa (em Watts por metro quadrado, ou Wm^{-2}) resultante do cenário no ano 2100. Os principais cenários são: RCP 2.6 (baixas emissões), RCPs 4.5 e 6.0 (estabilização de médias emissões de GEEs) e o RCP 8.5 (altas emissões).

Já no AR6 foram considerados novos cenários de emissões denominados SSP (*Shared Socio-Economic Pathways – Caminhos Socioeconômicos Compartilhados*), conforme Figura 1. Na prática, portanto, os cenários SSPs cobrem uma gama mais ampla de GEEs e poluentes atmosféricos que os RCPs. Eles são semelhantes, mas não idênticos, com diferenças nas trajetórias de concentração (IPCC, 2023).

O que são Shared Socio-Economic Pathways (SSP)?

- **SSP5-8.5** é o cenário de altas emissões (pessimista). Um cenário de referência alta, sem política climática adicional. As emissões de CO₂ praticamente dobram em relação aos níveis atuais até 2050. Níveis de emissões tão altos quanto SSP5-8.5 não são obtidos por modelos de avaliação integrada em nenhum dos cenários além do caminho de desenvolvimento socioeconômico movido a combustíveis fósseis.
- **SSP3-7.0** é o cenário de referência intermediário-a-alto resultante de nenhuma política climática adicional sob a narrativa de desenvolvimento socioeconômico. As emissões de CO₂ praticamente dobram em relação aos níveis atuais até 2100. Esse cenário tem emissões não-CO₂ particularmente altas, incluindo altas emissões de aerossóis.
- **SSP2-4.5** desvia-se ligeiramente de um cenário de referência “sem política climática adicional”, resultando em uma melhor estimativa de aquecimento em torno de 2,7°C até o final do século 21 em relação a 1850-1900.
- **SSP1-2.6** é o cenário onde o aquecimento permanece abaixo de 2,0°C em relação a 1850-1900 com emissões *net zero* de CO₂ na segunda metade do século.
- **SSP1-1.9** é o único cenário do IPCC que se alinha com a meta do Acordo de Paris para limitar o aumento médio da temperatura global bem abaixo de 2°C. Mantém o aquecimento em aproximadamente 1,5°C acima de 1850-1900 em 2100, após uma ligeira ultrapassagem (*overshoot*) e emissões *net zero* de CO₂ por volta da metade do século.

Figura 1 – Mudanças na temperatura global nos cenários do AR6.



Fonte: IPCC (2021).

O mundo tem hoje condições de cortar emissões pela metade em 2030 em relação a 2019 lançando mão de estratégias e tecnologias de mitigação que custam até US\$ 100 a tonelada de CO₂eq. Metade dessas estratégias custa menos de US\$ 20 a tonelada, e no setor de energia elétrica, em especial em eólica e solar, há potencial de redução a custo negativo – ou seja, é mais barato adotar as renováveis do que seguir com as fósseis para gerar energia elétrica. É importante frisar que estamos tratando de um cenário global bem diferente da realidade brasileira, que pode contar com hidrelétricas como fonte renovável extremamente relevante e cuja participação é muito superior a fontes eólica e solar, fontes renováveis de crescimento recente mais acelerado no mundo e no Brasil. De 2010 a 2019, houve reduções significativas nos

custos unitários de energia solar (85%), energia eólica (55%) e baterias de íon de lítio (85%). Como consequência, houve um aumento de 10 vezes na inserção de energia solar e de 100 vezes na de veículos elétricos (IPCC, 2023).

Os compromissos nacionais atualizados desde a COP26 fazem uma diferença insignificante em relação às emissões previstas para 2030 e o mundo está longe do objetivo do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a um valor muito inferior a 2°C, de preferência 1,5°C (UNEP, 2022). As políticas atualmente em vigor apontam para um aumento da temperatura de 2,8°C até ao final do século. Segundo o Relatório das Lacunas de Emissões¹ 2022 (UNEP, 2022) apenas uma transformação urgente em todo o sistema pode permitir os enormes cortes necessários para limitar as emissões de gases de efeito de estufa até 2030.

Conforme histórico apresentado no *White Paper* nº17 (Instituto Acende Brasil, 2017), as Conferências das Partes, denominadas COPs (do inglês, “*Conference of the Parties*”) têm sido desde 1995 o encontro internacional para o debate científico e político sobre as causas das mudanças climáticas globais, assim como para a assinatura de acordos de cooperação entre os países signatários e o estabelecimento de estratégias de mitigação e adaptação frente aos cenários futuros.

Dentre as edições passadas das COPs, uma que merece destaque é a COP21, realizada em 2015, onde foi estabelecido o Acordo de Paris, considerado o mais relevante em termos de potenciais benefícios globais desde o Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2014). O seu objetivo é impedir que o planeta se aqueça além de 1,5°C até o final do século 21, objetivo medido em relação à temperatura global da era pré-industrial. Cada país signatário estabeleceu metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), chamadas de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, no acrônimo em inglês).

Os desafios e as estratégias para combater o aquecimento global foram discutidos na COP26 realizada em novembro de 2021 na cidade de Glasgow, Escócia. Havia muita expectativa sobre os desdobramentos em relação a acordos e mecanismos para reduzir as emissões de GEEs, mas o texto final da Conferência deixou lacunas, como os compromissos climáticos entregues pelos países, considerados insuficientes para colocar o mundo na rota de 1,5°C (EPE, 2022). No entanto, a COP26 trouxe avanços, sobretudo para criação de um mercado de carbono internacional e para reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

O “Pacto de Glasgow para o clima” foi assinado por 197 países e foi o primeiro documento de uma COP a associar o aquecimento global aos combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo. Embora o texto final tenha ficado vago quanto a prazos e metas, esta foi a primeira vez em que se reconheceu o problema específico provocado pelas emissões de fontes fósseis (EPE, 2022). O Pacto ressalta a necessidade de se acelerar a transição energética e um dos desdobramentos da COP26 foi o fato de 450 instituições financeiras anunciarem o compromisso de alinhar os seus financiamentos às metas *net zero* até 2050, concordando em direcionar parte do financiamento das indústrias carbono intensivas para fomentar fontes renováveis. O texto final da COP26 também solicita aceleração nos esforços para reduzir subsídios ineficientes aos combustíveis fósseis e ao carvão que não usem tecnologia de compensação e captura de GEEs. Nesse sentido, um grupo de 40 países assinou um acordo paralelo para eliminar o uso de carvão mineral de sua matriz energética entre 2030 e 2040.

Em relação ao Brasil, além do texto da NDC, a delegação brasileira anunciou na COP26 as seguintes ações (MMA, 2021):

- Garantir 50% da matriz energética limpa até 2030;
- Zerar o desmatamento ilegal até 2028;
- Diminuir em 50% a emissão de carbono até 2030;
- Obter emissão líquida zero até 2050;

¹ Emissions Gap Report.

- Restaurar e reflorestar 18 milhões de hectares de florestas até 2030;
- Recuperar 30 milhões de hectares de pastagens degradadas; e
- Reduzir 75% das emissões de gases poluentes do transporte de carga e incentivar a ampliação da malha ferroviária.

Na mesma COP26 o Brasil também:

- assumiu o Compromisso Global sobre Metano (*Global Methane Pledge*²), em um esforço para reduzir as emissões de metano até 2030 em 30% em relação às emissões de metano de 2020; e
- assinou a Declaração dos Líderes de Glasgow sobre Florestas e Uso do Solo³, uma iniciativa para preservar as florestas e combater o desmatamento ilegal e a degradação dos solos até 2030.

Após a COP26, em abril de 2022, o governo brasileiro enviou à ONU a segunda atualização das NDCs deliberadas no Acordo de Paris. O documento foi amplamente criticado por organizações não governamentais de defesa do meio ambiente, que apontaram a alteração da linha de base como uma manobra para diminuir a meta brasileira de forma indireta e consequentemente levar a um retrocesso das ações do executivo federal no compromisso climático.

A NDC brasileira de 2015 estabelecia a meta de redução das emissões de GEEs em 37% até 2025 e em 43% até 2030, ambas em comparação às emissões de 2005. A meta para 2030 seria de 1.208 MtCO₂eq. Ela usava como linha de base para as metas a quantidade de emissões do Brasil de 2005 de acordo com o Segundo Inventário Nacional, produzido pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2021).

Já a segunda atualização da NDC, anunciada em Glasgow durante a COP26 de 2021, aumentou para 50% a meta para 2030, usando como base de cálculo o inventário de emissões da Quarta Comunicação Nacional, onde foi revista e atualizada a estimativa de emissão de 2.562 MtCO₂eq em 2005 (UNFCCC, 2022). Dessa forma, ao aplicar a nova meta de 50% de redução com base na Quarta Comunicação Nacional, o Brasil deverá chegar em 2030 emitindo 1.281 MtCO₂eq, ou seja, 73 MtCO₂eq a mais do que o previsto na NDC de 2015.

O Brasil recentemente vem aumentando suas emissões de GEEs, ao invés de reduzi-las para cumprir as metas propostas no Acordo de Paris. Os dados – que foram apresentados no espaço *Brazil Climate Action Hub* da COP27 – indicam que as emissões líquidas avançaram 21,4% nos últimos sete anos, saltando de 1.446 MtCO₂eq em 2015 para 1.756 MtCO₂eq em 2021.

Em novembro de 2022 foi realizada a COP27 em Sharm el-Sheikh, no Egito. Após os encaminhamentos positivos da COP26, as expectativas eram altas para essa edição em relação à apresentação de planos climáticos mais ambiciosos e soluções que correspondessem à escala do problema global, mas o evento não abriu novos caminhos e se concentrou mais nos impactos do que nos planos para implementação das ações de mitigação e adaptação.

Apesar da ausência de metas de implantação, alguns avanços foram obtidos nessa última edição da COP, como o acordo inovador para criação de um fundo para perdas e danos destinado a países vulneráveis duramente atingidos por enchentes, secas e outros desastres climáticos (WRI, 2022)⁴. O reconhecimento da necessidade de fornecer mais financiamento para o clima também foi pauta relevante: bancos multilaterais e instituições financeiras foram convocados a implementar reformas que incorporem a emergência climática global e viabilizem o financiamento climático. As chamadas ‘Soluções Baseadas na Natureza’ (*Nature-Based Solutions*) também foram incluídas pela primeira vez com um texto que incentiva as partes a considerarem abordagens ecossistêmicas e, ao mesmo tempo, assegura garantias sociais e ambientais relevantes.

² Disponível em https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_21_5766.

³ Disponível em <https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/>.

⁴ Disponível em <https://www.wri.org/insights/cop27-key-outcomes-un-climate-talks-sharm-el-sheikh>.

3 O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2022 (EPE, 2022a), a geração de energia elétrica⁵ no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 656,1 TWh em 2021, resultado 4% acima de 2020. De 2020 para 2021, a geração hídrica, principal fonte de produção de energia elétrica no Brasil, teve redução de 8,6%, enquanto a geração eólica teve crescimento de 26,7%.

A geração elétrica a partir de não renováveis representou 22,6% do total nacional, contra 16,8% em 2020. Entretanto, é importante destacar a evolução do gás natural neste resultado, uma vez que ao longo dos últimos dez anos o gás deslocou o óleo combustível e o diesel e contribuiu para minimizar as emissões provenientes da geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis.

As fontes renováveis representaram 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2021. A oferta interna é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional somada às importações, que são essencialmente de origem renovável. Esse percentual foi menor que o observado em 2020 (83,8%) (EPE, 2022a) devido à queda da oferta hidráulica, que foi em parte compensada pelo aumento da geração termelétrica, principalmente a gás natural. Em 2021, houve avanço de 24% na geração termelétrica e, com isso, a participação de termelétricas no total da geração de energia elétrica aumentou para 31,1%.

De acordo com a EPE (2022a), a escassez de chuvas em 2021 provocou uma redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país e a consequente redução da oferta de hidroeletricidade. Esta queda foi compensada pelo aumento da oferta de outras fontes, como o carvão mineral (+47,2%), gás natural (+46,2%), eólica (+26,7%) e solar fotovoltaica (+55,9%), alcançando a geração de 17.585 GWh, 86.957 GWh, 72.286 GWh e 16.752 GWh, respectivamente.

Em 2021, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras, não incluída a mini e microgeração distribuída) alcançou 181.610 MW, um aumento de 3,9% em relação a 2020, com destaque para eólica e solar (Figura 2). Na expansão da capacidade instalada, as centrais eólicas contribuíram com 3.640 MW, ou 53% do total adicionado. Em 2021, a potência instalada para geração eólica no país se expandiu em 21,2%. Segundo o Banco de Informações da Geração (SIGA) disponibilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o parque eólico nacional atingiu 20.771 MW.

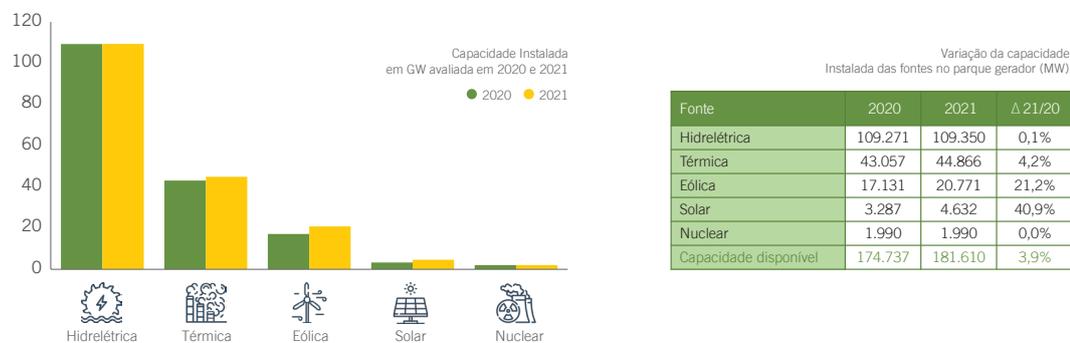


Figura 2 – Participação das fontes na capacidade instalada em 2021

Fonte: EPE (2022a)

⁵ Inclui geração distribuída.

Em 2021 a Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) atingiu 9.810 GWh de geração a partir de uma potência instalada de 8.965 MW. Destaca-se a fonte solar fotovoltaica, com 9.019 GWh de geração e 8.771 MW de potência instalada. Em outras palavras, a MMGD em 2021 teve um aumento de 84% de 2020 para 2021, sendo que a energia solar fotovoltaica representou 88,3% da MMGD em 2021, posicionando-se como a fonte de maior expansão no período.

3.2 EXPANSÃO DA MATRIZ E PERFIL DA OPERAÇÃO

A fonte hídrica, que no começo do século representava 83% da capacidade instalada e que em 2021 respondeu por 58% da matriz, deverá reduzir sua participação relativa para cerca de 46% até 2031 de acordo com as premissas adotadas no Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (EPE, 2022b) para o Cenário de Referência (carga de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) crescendo à taxa média de 3,4% a.a. entre 2021 e 2031).

Segundo EPE (2022b), em termos de capacidade instalada (Figura 3), observa-se a maior diversificação da matriz elétrica brasileira ao longo do período 2021-2031, com a redução na participação hidrelétrica sendo compensada pelo crescimento da capacidade instalada das fontes eólica e solar. Também merece destaque o crescimento da participação das fontes renováveis em autoprodução e geração distribuída, de 8% para 17%, aumentando a capacidade instalada total de fontes renováveis na matriz elétrica. Estima-se que a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil mantenha, em 2031, o nível de renovabilidade de 2021, que foi de 83%.

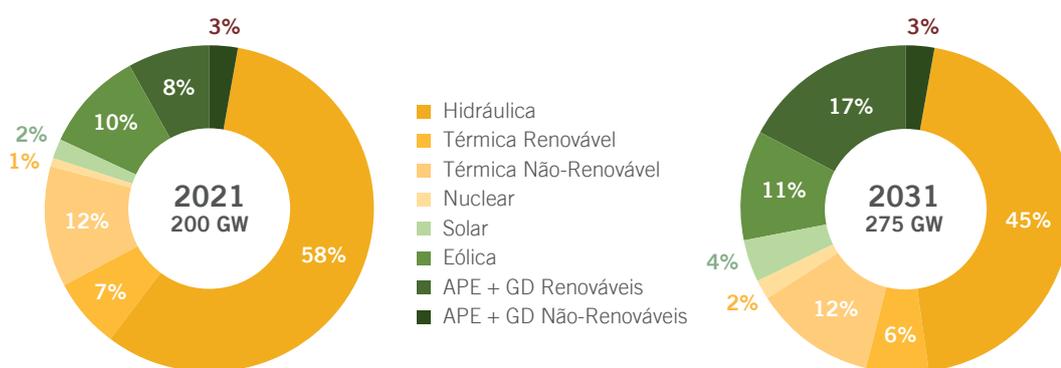


Figura 3 – Evolução da capacidade instalada total por fonte⁶

Fonte: EPE (2022b)

⁶ Nota: Inclui parcela da UHE Itaipu pertencente ao Paraguai.

3.3 EMISSÕES DE GEEs

O Brasil integra o grupo dos 10 maiores emissores de GEEs do mundo (Climate Watch, 2023). No entanto, diferentemente das grandes economias mundiais, cujas emissões concentram-se no setor de energia, a mudança do uso da terra e a agropecuária respondem por quase 75% das emissões brasileiras. O setor elétrico brasileiro, com sua matriz de geração predominantemente renovável, responde por apenas 2,4% das emissões totais do país (SEEG, 2023).

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2022a), em 2021 o total de emissões de CO₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 445,4 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂eq), valor 12,4% maior que no ano anterior. As emissões do setor são predominantemente de gás carbônico (95%), que ocorrem pelo processo de combustão dos combustíveis fósseis. Essa queima é, contudo, imperfeita e, como consequência, também são produzidos CH₄ (metano), CO (monóxido de carbono) e NMVOC⁷. Como efeito secundário, ocorre também a geração de N₂O (óxido nitroso) e NOx (óxidos de nitrogênio).

De acordo com os dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2023), a participação do setor energético (que inclui além do setor elétrico, as emissões dos transportes, indústrias e residências) nas emissões brasileiras foi de 18% em 2021, de modo que as emissões que se sobressaem são aquelas oriundas da mudança do uso da terra (49%), conforme pode ser observado na Figura 4. O total de emissões brutas de GEEs no Brasil em 2021 atingiu 2,4 bilhões de toneladas de CO₂eq, de modo que quase metade dessas emissões foi decorrente de mudanças no uso da terra, lideradas pelo desmatamento ilegal (SEEG, 2023). Segundo dados do PRODES⁸, a área desmatada por corte raso em 2020 foi de 11 mil km² na Amazônia Legal e cerca de 7,3 mil km² no Cerrado, levando à emissão de 633 MtCO₂eq e 111 MtCO₂eq, respectivamente.

A subcategoria de Transportes foi responsável por quase metade (47%) das emissões observadas em 2021 no setor energético.

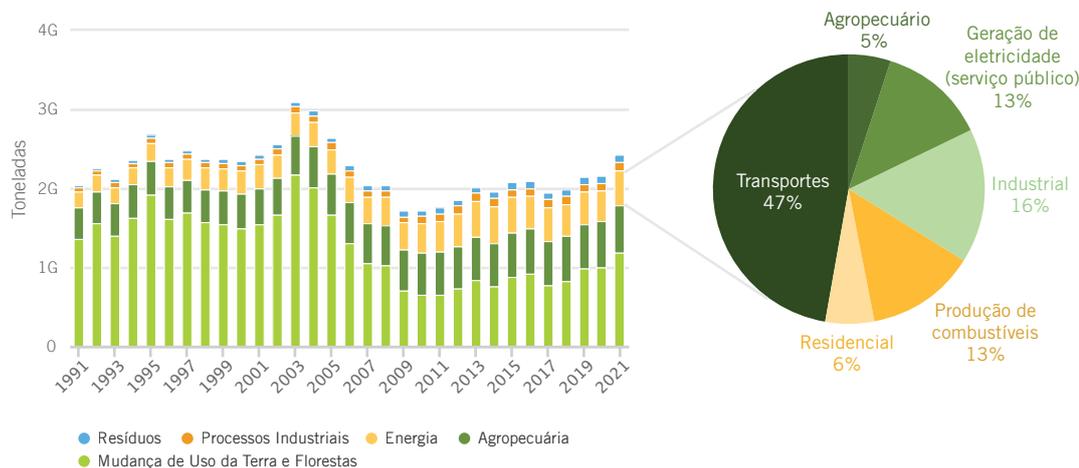


Figura 4 – Emissões de Gases de Efeito Estufa brasileiras, com destaque para energia, incluindo transportes, agropecuário, combustíveis, indústrias, residências e energia elétrica.

Fonte: SEEG (2023).

⁷ Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metano (*Non-Methane Volatile Organic Compounds*).

⁸ Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite.

O setor de energia elétrica brasileiro se destaca por possuir uma matriz elétrica com grande participação de fontes renováveis (cerca de 80%), realidade verificada em poucos países do mundo. Isso significa que as emissões de GEEs por unidade de energia consumida no Brasil são pequenas comparativamente a outros países (EPE, 2022a). Importante pontuar que nos anos de 2020 e 2021 as atividades produtivas e, conseqüentemente, o setor elétrico, foram impactados pela pandemia da Covid-19, o que teve efeito direto sobre as emissões de GEEs.

Notou-se um crescimento das emissões totais associadas à matriz energética brasileira a uma taxa média anual de 2,1% desde 2000. A maior parte (197,8 MtCO₂eq) foi decorrente do uso de combustíveis fósseis no setor de transportes. Em 2021, o setor elétrico brasileiro emitiu 118,5 kg CO₂eq para produzir 1 MWh. Esse valor é cerca de 37% do valor emitido pela União Europeia, 27% do que é emitido pelo setor elétrico americano e 15% do que é emitido pelo setor elétrico chinês.

4 RISCOS CLIMÁTICOS

4.1 POTENCIAIS IMPACTOS

O setor elétrico global está fortemente relacionado com as questões climáticas, seja pela sua relevância nas emissões de GEEs (realidade distinta no Brasil, cuja matriz elétrica responde por apenas 2,4% das emissões totais, como apresentado na Seção 3) na produção e uso de energia, seja pela sua vulnerabilidade às alterações do clima. Dessa maneira, as políticas e as discussões climáticas são determinantes para o planejamento energético mundial.

Os impactos ao setor elétrico mais reiterados por estudiosos em relação às mudanças climáticas graduais são:

- o aumento da temperatura média,
- a diminuição da precipitação média,
- o aumento de ventos em áreas áridas e litorâneas, e
- a elevação do nível do mar.

Isolados ou combinados, esses impactos amplificam vulnerabilidades e diminuem eficiência, podendo reduzir ou mesmo interromper a operação das instalações e das infraestruturas de energia (MCTI, 2021). As medidas de adaptação em resposta podem variar desde a utilização de equipamentos com melhor vedação climática, reuso da água, refrigeração a seco etc., até a construção de obras de proteção, realocação de projetos ou sua construção em locais mais seguros.

Em relação a eventos climáticos extremos, cuja incidência se torna mais frequente, são citados:

- calor extremo,
- ventos fortes,
- tempestades,
- inundações,
- deslizamentos de terra,
- aridez,
- raios,
- incêndios, dentre outros.

Os impactos oriundos dessas ameaças também acentuam a vulnerabilidade de equipamentos e estruturas, além de reduzir sua eficiência, com implicações diretas na geração de energia (MCTI, 2021).

Assumindo-se que não haverá nenhuma adaptação e que todos os riscos se materializem simultaneamente, a S&P Global Ratings constatou – em uma análise exploratória de cenários de vulnerabilidade e preparação de 135 países em relação às mudanças climáticas nos próximos 30 anos – que os riscos climáticos podem expor 3,3%; 4,0% e 4,5% do PIB mundial a perdas até 2050 sob os cenários climáticos RCP2.6 (Acordo de Paris), RCP4.5 (políticas atuais) e RCP8.5, respectivamente.

A avaliação de vulnerabilidade realizada nesse estudo (S&P Global, 2022) concluiu que os impactos regionais dos riscos climáticos variam muito e são mais pronunciados no sul da Ásia (10% a 18% do PIB em risco⁹) e altos para a Ásia Central, Oriente Médio, Norte da África e África Subsaariana. As estimativas de perda econômica mostram que os países de renda média e baixa provavelmente sofrerão, em média, perdas 3,6 vezes maiores que os países de renda média-alta e alta.

⁹ Tradução livre da expressão em inglês *GDP at risk*.

Além disso, a chamada 'avaliação de prontidão'¹⁰ do estudo destacou que as perdas econômicas tendem a ser maiores e mais persistentes para esses mesmos países, que têm menor capacidade de adaptação, instituições menos atuantes e menor capacidade financeira (S&P Global, 2022). A cooperação e o apoio internacional podem ajudar os países mais vulneráveis a financiar uma crescente lacuna de adaptação enquanto criam resiliência para as mudanças climáticas, uma vez que estes países contribuíram relativamente pouco para as causas do problema, mas sofrem de maneira desproporcional suas consequências.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) informou que, em média, um desastre relacionado ao tempo, clima ou água ocorreu todos os dias nos últimos 50 anos, causando 115 mortes diárias e mais de USD 202 milhões em perdas diárias. Além disso, mais de 90% de todas as mortes associadas a esses desastres ocorreram em países em desenvolvimento. Embora o número de mortes tenha diminuído três vezes neste prazo – graças aos sistemas de alerta precoce e melhor gerenciamento e preparação para desastres – a frequência de tais eventos aumentou quase cinco vezes nos últimos 50 anos.

Se a tendência atual continuar, o número de desastres pode aumentar para 560 por ano até 2030 - um aumento de 40% em comparação com 2015 (Escritório das Nações Unidas para Redução de Riscos de Desastres, 2022). Mais recentemente, o Grupo de Trabalho II do AR6 constatou que entre 3,3 e 3,6 bilhões de pessoas vivem em áreas altamente vulneráveis às mudanças climáticas, reforçando ainda mais a necessidade de adaptação.

A análise dos cenários climáticos destaca que as perdas do PIB ligadas a riscos climáticos provavelmente aumentarão para a maioria das regiões ao longo do tempo e em cenários de aquecimento mais dramáticos. O alinhamento da redução das emissões com o Acordo de Paris (ou seja, RCP2.6) ainda poderia impedir que o mundo testemunhe perdas crescentes ligadas a riscos climáticos, prevendo-se que a exposição aumente apenas cerca de 3%, contra 17% e 23% nos Cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente. No cenário do Alinhamento de Paris, um ritmo menos pronunciado do aquecimento global também daria aos países mais tempo para se adaptarem a condições mais adversas (S&P Global, 2022).

Em relação às vulnerabilidades do setor elétrico, elas geralmente se enquadram em duas categorias: infraestrutura ou processo. As vulnerabilidades de infraestrutura geralmente são fáceis de resolver, mas tendem a ser muito caras (como o reforço do sistema); já as vulnerabilidades de processo tendem a ser mais complexas, mas geralmente requerem correções relativamente baratas (como treinamentos e desenvolvimento de normas) (NREL, 2019).

Analisando-se os potenciais efeitos das mudanças climáticas sobre os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia para o Brasil, cuja base da geração de eletricidade é a hidráulica, tem-se que o atributo climático que mais afeta os recursos é a variabilidade na precipitação.

No entanto, além do impacto na precipitação, a vazão dos rios também pode ser afetada: a redução da vazão pode ser de duas a quatro vezes maior que o declínio na precipitação (Arnell, 2004) devido a mudanças dos níveis de umidade nos solos e da evapotranspiração da cobertura vegetal predominante na área da bacia hidrográfica. Eventos extremos de aumento de precipitação podem resultar em inundações que podem danificar a infraestrutura das barragens e das turbinas de forma direta, além de provocar impactos indiretos por meio da mobilização de detritos nas áreas alagadas a montante. Os recursos hídricos disponíveis para o setor serão reduzidos em função de temperaturas médias mais altas, aumentando as perdas por evaporação de rios e represas (IAEA, 2019).

A base de recursos da energia eólica também será afetada por mudanças graduais na temperatura, levando a mudanças nas diferenças de pressão e, portanto, no regime de ventos, e pela menor densidade do ar devido a temperaturas médias mais altas (Pryor e Barthelmie, 2010; Pryor e Barthelmie, 2013; Pryor e Schoof, 2010).

¹⁰ Tradução livre do termo em inglês *readiness*.

No geral, o aumento gradual das temperaturas médias implica menor densidade do ar, que leva à redução da geração de energia. Não há nada que projetistas e operadores possam fazer para alterar esta lei da Física. Episódios climáticos extremos não afetam a base de recursos do setor, mas podem afetar severamente a operação de instalações (parques) de energia eólica (IAEA, 2019). Ironicamente, o maior risco climático para as instalações de energia eólica é o excesso de vento. Condições extremas de vento forte (mudança de direção, rajada ou cisalhamento) podem comprometer a integridade estrutural das turbinas (Haugen e Iversen, 2008; Pryor, 2011) e danificar vários componentes como torres e pás, reduzindo assim a produção de energia (Walter, 2009).

Em relação à energia solar, mudanças na insolação e nebulosidade são os principais efeitos das mudanças climáticas graduais sobre a base de recursos para todos os tipos de energia solar: térmica, fotovoltaica e energia solar concentrada (CSP¹¹). Uma temperatura média crescente reduz a eficiência de conversão da energia fotovoltaica. Estima-se que a eficiência fotovoltaica caia cerca de 0,5%/°C de aumento de temperatura para o silício cristalino (Vick e Clark, 2005) e módulos de filme fino (Mohring, 2004). Além disso, a exposição prolongada a temperaturas mais elevadas provoca o envelhecimento mais rápido do material sensível das placas (California, 2020).

Sobre os impactos das mudanças climáticas nas redes de transmissão e distribuição de energia, a IAEA (2019) aponta que o aumento das temperaturas médias causará grandes perdas na rede de transmissão. Ventos fortes, tempestades, tornados e furacões devem continuar sendo a principal causa de falhas no sistema devido à exposição de vários componentes da rede a esses tipos de intempéries. Incêndios florestais também são uma ameaça à integridade das redes de transmissão.

Mesmo que a infraestrutura de transmissão e distribuição de energia elétrica não seja prejudicada, ainda há o potencial de redução do nível de serviço: eventos de alto calor fazem com que as linhas de energia e outras infraestruturas de rede operem com capacidade reduzida, limitando a quantidade de energia que o sistema pode transportar. Ao mesmo tempo, a demanda elétrica aumenta durante picos de calor uma vez que mais pessoas tendem a ligar os sistemas de refrigeração, e isso provavelmente será mais frequente com o advento das mudanças climáticas. Essa combinação de capacidade reduzida e demanda aumentada sobrecarrega a rede elétrica, aumentando a possibilidade de falha do sistema e causando quedas de energia (California, 2020).

A Eletrosul identificou e avaliou os principais riscos climáticos que impactam estruturalmente as linhas de transmissão no estado de Santa Catarina (Castro, 2020). Além dos temporais e ventos fortes, as descargas atmosféricas também foram apontadas como ameaças importantes às linhas de transmissão, uma vez que podem causar desligamentos e eventual rompimento dos cabos. Apesar da curta duração, as descargas atmosféricas provocam danos especialmente em condutores e cabos para-raios, derretendo ou rompendo os filamentos dos cabos, além de provocar degradação no desempenho operacional das linhas de transmissão devido a desligamentos. As altas temperaturas associadas a períodos de “calmaria de ventos” também impacta diretamente na diminuição da condução de energia elétrica através dos cabos por questões de segurança (Castro, 2020).

Os portos marítimos também são um importante centro para alguns combustíveis, e inundações costeiras e o aumento do nível do mar podem interromper as operações nessas instalações, afetando o suprimento de energia por depender destes portos. No caso do Porto de Itajaí e seu histórico de eventos climáticos extremos ocorridos na região, os riscos climáticos que mais impactam o porto são as enchentes, fortes correntezas, assoreamento, ondas, ressacas e ventos fortes (Jardewski, 2020).

¹¹ Do termo em inglês *Concentrated Solar Power*.

A construção de resiliência aos impactos das mudanças climáticas requer investimentos significativos dos setores público e privado, com retorno muitas vezes atrasado por vários anos ou mesmo décadas. Ao mesmo tempo, os países exigem dados melhores para auxiliar nos esclarecimentos acerca dos riscos climáticos e avaliações de vulnerabilidade, bem como melhores informações sobre a capacidade adaptativa e monitoramento da eficácia das medidas de adaptação (S&P Global, 2022).

A possível variação da temperatura do ar nos próximos anos poderá influenciar o equilíbrio dos padrões de demanda de energia para aquecimento e resfriamento em diferentes setores, tais como edifícios residenciais, comerciais, de serviços e públicos, transporte e indústrias (IEA, 2019). Esses efeitos têm implicações diretas para a confiabilidade do fornecimento de energia, além de aumentar custos e impactos ambientais. De acordo com a IEA (2019), a tendência para os próximos anos é que o crescimento contínuo da população, o desenvolvimento das economias emergentes e a mudança do clima aumentem a demanda por aquecimento e resfriamento de ambientes.

4.2. VULNERABILIDADES DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Não é novidade que o setor elétrico brasileiro é impactado pelo sistema climático, visto que a matriz elétrica nacional em sua maior parte é renovável e depende de recursos naturais.

Entretanto, a energia térmica ainda é muito utilizada no Brasil para suprir a demanda energética quando as outras fontes não são suficientes: as termelétricas responderam por 31,1% do total de energia gerada em 2021. Indiretamente, portanto, a energia térmica está relacionada com o clima, pois se os reservatórios estão com volumes comprometidos pela escassez de chuva, as usinas termelétricas são acionadas e, além dos impactos ambientais provocados pela queima dos combustíveis nas usinas, o preço da energia elétrica aumenta devido ao custo dos combustíveis consumidos no acionamento das usinas, impactando diretamente o consumidor (Arroyo, 2018; Jong *et al.*, 2019; Lucena *et al.*, 2018; Paredes *et al.*, 2017).

Em relação à matriz hidrelétrica, destaca-se o papel fundamental do ciclo hidrológico na geração de energia elétrica no Brasil. O AR6 mostra que as regiões Nordeste, Centro-Oeste e leste do Norte são as que mais apresentam aumentos das frequências de eventos de secas severas, o que é preocupante para o setor hidrelétrico. Considerando-se a importância da participação dessa fonte, tanto na capacidade instalada atual como na modernização prevista para o horizonte decenal, e sua ampla distribuição geográfica, espera-se que alterações no regime de chuvas em qualquer região brasileira impactem diretamente a geração hidrelétrica (EPE, 2022b). Além disso, a umidade disponível no solo – fator fundamental para uma eficiente manutenção e elevação do volume de água das bacias hidrográficas – está diminuindo, piorando os cenários para o setor hidráulico nas regiões afetadas.

A mudança do clima também pode trazer impactos sobre o potencial eólico brasileiro, uma vez que o regime de ventos define o potencial de geração eólica (Lucena *et al.*, 2009) e a velocidade do vento varia significativamente com a altura, tipo de cobertura do solo e vegetação. Mudanças na variabilidade horária, diária ou sazonal natural de velocidade do vento têm impacto significativo na energia produzida a partir de turbinas eólicas (Schaeffer *et al.*, 2012).

Já a geração solar térmica pode ser favorecida no território brasileiro com o aumento da temperatura e irradiação solar. O Nordeste e a região central do Brasil são as regiões mais propícias a aumentos significativos da geração solar. Nestas regiões, em média, as taxas de incidência de radiação solar na superfície são altas e os períodos secos estão ficando mais prolongados, diminuindo a cobertura de nuvens por mais tempo. A presença de nuvens e a variação de temperatura têm impacto sobre a quantidade de irradiação solar disponível para a geração de energia fotovoltaica (Bull *et al.*, 2007). Temperaturas médias mais altas melhoram a eficiência do aquecimento solar (especialmente em regiões mais frias), mas reduzem o desempenho de conversão dos módulos fotovoltaicos. A eficiência solar fotovoltaica diminui em ~0,5% para cada 1°C de aumento da temperatura do silício cristalino e dos módulos de filme fino.

No que se refere aos impactos sobre a transmissão de eletricidade brasileira, a dimensão continental do país implica sistemas de transmissão em larga escala e entre regiões, tornando o sistema mais susceptível a fatores climáticos. Dentre os fatores climáticos incluem-se as ondas de calor, a intensificação de veranicos (períodos com baixa umidade do ar e altas temperaturas fora de estação) e os eventos extremos. A necessidade de compatibilizar diferentes capacidades de oferta e perfis de demanda pode se agravar em um cenário de variabilidade climática mais intensa.

O elevado investimento e o tempo de construção das obras necessárias ao sistema elétrico nacional colocam maior peso nas decisões presentes e conferem menor flexibilidade frente a condições futuras (MCTI, 2021).

Os eventos climáticos extremos representam sérios riscos para os sistemas naturais, populações e infraestruturas existentes. O Brasil investe bilhões anualmente em obras de infraestrutura de médio e grande porte, porém o planejamento dessas obras não tem contemplado de forma eficiente as questões relacionadas à mudança do clima, elevando, assim, as chances de prejuízos não previstos com consequências negativas para a economia e a sociedade (Queiroz *et al*, 2016; Di Giulio *et al*. 2019).

Mudanças climáticas também podem resultar em impactos nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica:

- o aumento da temperatura média do ambiente produz efeitos de redução da capacidade de transmissão e distribuição de energia; e
- a ocorrência de eventos climáticos extremos resultaria em maior vulnerabilidade da ocorrência de falhas e blecautes na rede de transmissão e distribuição.

Em 3 de novembro de 2023 ocorreu uma forte tempestade na cidade de São Paulo (SP). Durante o ocorrido, houve fortes rajadas de vento com velocidade de 56 nós (ou 103,7 km/h) registrados no Aeroporto de Congonhas/SP.

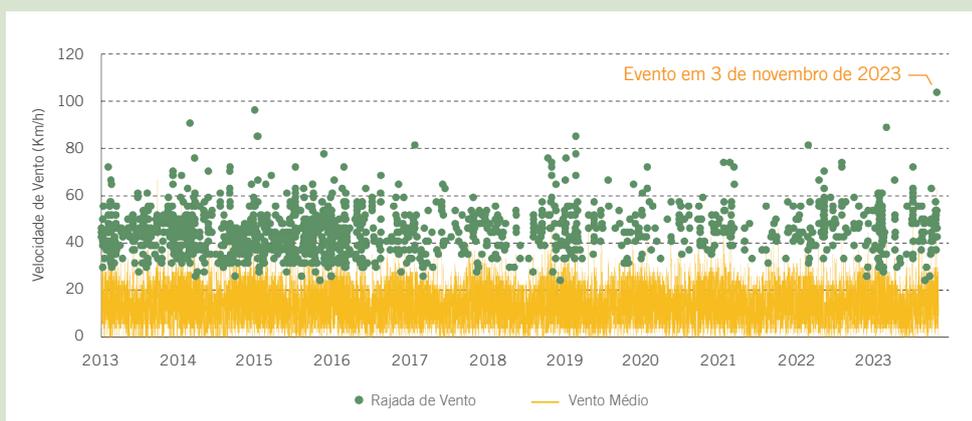


Figura 5 – Histórico de Velocidade de Vento registrado no Aeroporto de Congonhas/SP

Fonte: Iowa State University (2023)

Para fins de comparação, a NBR 5422 que trata sobre projeto de linhas aéreas, considera um mapa de ventos conforme Figura 6. Assim, para o estado de São Paulo, a velocidade de projeto é de 26 m/s, ou 94 km/h (CPFL Energia, 2020).

Ou seja, o evento ocorrido em 3 de novembro de 2023 em São Paulo apresentou condições severas de vento, excedendo o padrão limite utilizado no próprio projeto das linhas.



Figura 6 – Velocidades básicas de vento para projeto de linhas aéreas

Fonte: CPFL Energia (2020).

Como resultado, vários pontos de conexão na rede de distribuição de São Paulo sofreram desligamentos. Estima-se que cerca de 2 milhões de residências na capital paulista tenham ficado sem energia elétrica.

4.3 PROPOSTAS DE SOLUÇÕES ADAPTATIVAS

Lidar com as mudanças climáticas depende de duas abordagens de alto nível:

- uma é a adaptação, que trata sobre a redução de danos causados pelos efeitos das mudanças do clima; e
- a outra é a mitigação das emissões de GEEs responsáveis por causar mudanças climáticas, também chamada de mitigação de mudança climática, mitigação de emissões de GEEs ou ação climática.

A sociedade deve adotar estratégias que suportam ambos os objetivos e a Figura 7 ilustra a relação entre essas duas abordagens. Por exemplo, casas que instalam painéis solares e sistemas de armazenamento de bateria são mais bem protegidos contra interrupções relacionadas ao clima no fornecimento de eletricidade (um esforço de adaptação), mas os painéis solares também geram eletricidade sem emissão de GEEs e permitem que as residências usem menos energia de usinas que emitem GEEs (um esforço de mitigação) (Califórnia, 2020).

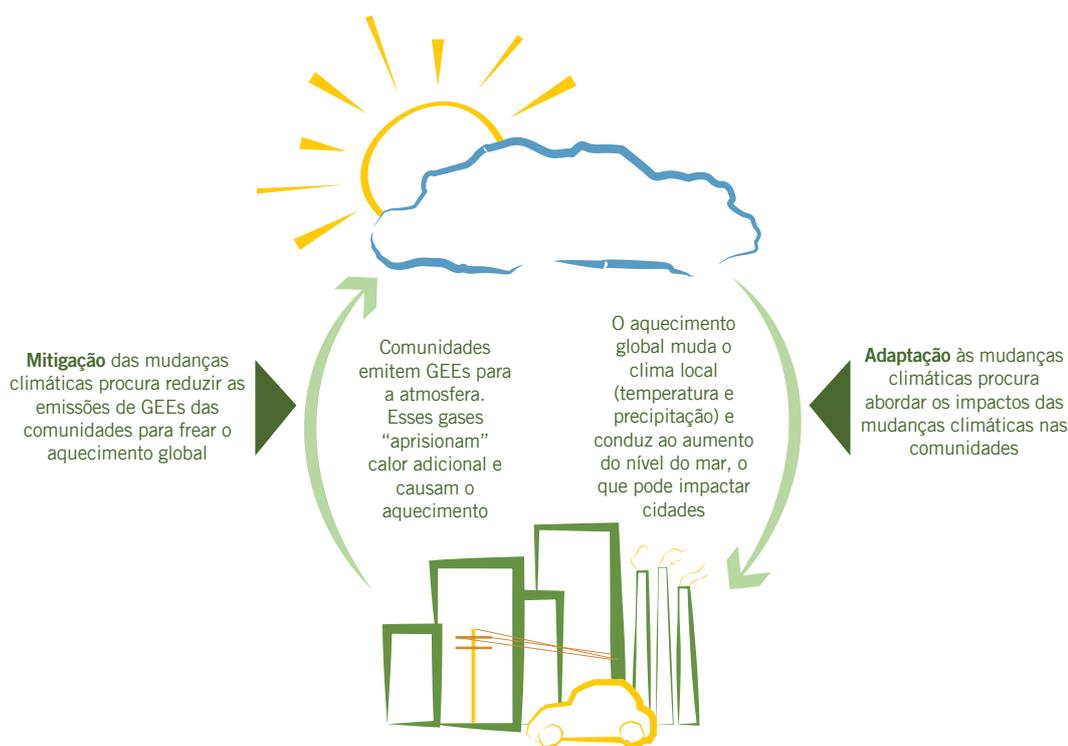


Figura 7 - Ilustração das abordagens de Mitigação e de Adaptação aos efeitos das Mudanças Climáticas.

Fonte: adaptado de Califórnia (2020).

Desde 2010, tem havido um crescente interesse em estudos de impacto que exploram opções e seus custos associados para reduzir a vulnerabilidade do setor elétrico às mudanças climáticas, os impactos de longo prazo e as opções de adaptação.

O setor global de energia elétrica enfrenta um duplo desafio nos próximos 20 a 30 anos, pois:

- além de o setor precisar ser transformado em um sistema de baixo carbono em resposta à mitigação das mudanças climáticas;
- o setor também precisa se adaptar às mudanças climáticas e seus efeitos para garantir que o fornecimento de eletricidade permaneça seguro e confiável (IAEA, 2019).

A adaptação é um objetivo importante do Acordo de Paris: “Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos adversos das mudanças climáticas e promover a resiliência climática e o desenvolvimento de baixas emissões de gases de efeito estufa, de maneira que não ameace a produção de alimentos” (UNFCCC, 2015). Apesar disso, todas as disposições relacionadas à vulnerabilidade e adaptação apresentadas no Acordo de Paris são em nível genérico. Com exceção do princípio que afirma que a adaptação e o baixo desenvolvimento de GEEs não devem ameaçar a produção de alimentos, nenhum setor ou atividade econômica é mencionado em conjunto com a adaptação. Dessa forma, o setor de energia não é contemplado com um plano de medidas adaptativas específico, mas pode se apropriar de algumas das diretrizes e procedimentos propostos no âmbito geral (IAEA, 2019).

No intuito de auxiliar no planejamento de estratégias adaptativas para o curto, médio e longo prazo, diversos processos e guias foram desenvolvidos na última década.

A Agência Internacional de Energia Atômica¹² publicou em 2019 um roteiro intitulado “Adaptando o setor elétrico às mudanças climáticas” (IAEA, 2019), por meio do qual explorou a diversidade de impactos no setor elétrico resultantes das mudanças climáticas graduais e eventos climáticos extremos, e as possíveis formas para combatê-los. A publicação apresenta os potenciais impactos das alterações graduais do clima e eventos extremos sobre as fontes de energia nuclear e térmica, assim como as vulnerabilidades das tecnologias renováveis como a hidrelétrica, eólica e solar. Para cada possível impacto, são apresentadas algumas soluções adaptativas para conferir maior resiliência ao setor.

Os impactos mais significativos elencados para as usinas termelétricas são semelhantes aos das usinas nucleares:

- a redução da eficiência térmica devido ao aumento das temperaturas médias; e
- o menor volume e maior temperatura da água nos rios e lagos próximos, o que afetaria a eficiência do resfriamento e a disponibilidade de água para resfriamento.

Várias alternativas de resfriamento estão disponíveis para os planejadores e operadores de usinas térmicas existentes para gerenciar o risco de escassez de água. Elas variam:

- desde opções simples e conservadoras (como usar fontes de água não tradicionais, reaproveitar água de processo de gases de combustão, secar o carvão e usar condensadores);
- até tecnologias mais radicais e caras, como resfriamento a seco.

Em relação aos eventos extremos, as implicações para usinas termelétricas são diversas e podem levar a graves danos estruturais e perdas financeiras. Proteger os estoques de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) contra o superaquecimento, inundações, ventos extremos e raios é de grande importância para garantir a operação ininterrupta das usinas, mesmo sob condições climáticas severas (IAEA, 2019).

Em relação às energias renováveis, na Tabela 1 estão apresentadas algumas das principais medidas adaptativas indicadas às fontes hídrica, eólica e solar para reduzir os impactos climáticos mais significativos.

¹² Do nome em inglês *International Atomic Energy Agency*.

Tabela 1 – Impactos e opções de adaptação das mudanças climáticas e eventos extremos para energia hidrelétrica, eólica e solar

ENERGIA	IMPACTO	POTENCIAIS VULNERABILIDADES	EXEMPLOS DE OPÇÕES DE ADAPTAÇÃO
HIDRELÉTRICA	Mudança na precipitação	Amplificada pelas condições de escoamento, a mudança resultante na disponibilidade de água determina se a produção de energia é reduzida ou aumentada	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar a capacidade de armazenamento • Ajustar o cronograma de liberação de água para maximizar a geração
	Mudanças na variabilidade sazonal e interanual da precipitação	Maior variabilidade de precipitação leva a maiores flutuações nas vazões, que podem modificar a produção sazonal e anual de energia; Picos de vazão podem causar inundações e perdas na produção de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar as previsões de vazão de água no curto prazo • Ajustar as estratégias de gestão da água • Criar capacidade de armazenamento adicional • Aumentar a capacidade do rotor da turbina
	Eventos de precipitação extrema	As inundações resultantes podem danificar direta e indiretamente as paredes de barragens e as turbinas, por meio da mobilização de detritos em áreas inundadas a montante As inundações levam a perdas na produção de energia devido à passagem de água através dos vertedouros	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar a capacidade de armazenamento e aprimorar estruturas de segurança das barragens e turbinas • Ajustar o gerenciamento hídrico para reter o armazenamento excedente em caso de excesso de água • Remover os detritos
	Baixa precipitação e alta temperatura	Ambos os eventos reduzem a quantidade de água armazenada	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar a capacidade de armazenamento, se possível, para reter mais água de altas vazões
EÓLICA	Mudança no vento (densidade de energia eólica)	Como a intensidade do vento determina o potencial de energia eólica, qualquer alteração pode modificar a quantidade de energia gerada	<ul style="list-style-type: none"> • Aprimorar a avaliação de recursos e a seleção do local de instalação do parque de acordo com as mudanças nas condições do clima
	Variabilidade interanual, sazonal ou diurna	A variabilidade determina o tempo de disponibilidade de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Construir e manter capacidade de reserva
	Ar mais seco, aumentando a poeira soprada pelo vento	O ar seco e o vento causam deposição de poeira nas pás, o que reduz a potência	<ul style="list-style-type: none"> • Modificar o desenho da turbina e os revestimentos das pás • Aumentar a frequência de limpeza e manutenção das pás
	Mudança na atividade das ondas do mar e do acoplamento vento-onda	Rajadas de vento, correntes marítimas, ondas e gelo podem causar danos estruturais em fundações e torres <i>offshore</i> , levando a falhas	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustar as especificações dos projetos de acordo com as condições de ondas e vento
	Extremos de velocidade do vento (mudança repentina de direção, rajada e cisalhamento)	Os ventos extremos aumentam a carga estrutural e ameaçam a integridade estrutural das turbinas eólicas e podem causar fadiga e danos aos componentes da turbina, levando à redução na produção de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar o projeto da turbina e utilizar estruturas reforçadas para suportar condições extremas de vento • Usar a tecnologia LIDAR¹³ (anemômetro a laser) para detectar as variações nas características da massa de ar
	Temperaturas extremamente baixas e altas	Temperaturas extremas podem modificar as propriedades físicas (expansão e contração) de materiais e fluidos	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar faixas de temperaturas extremas no material da turbina e na seleção do lubrificante
	Mudança na frequência dos raios	Os raios podem danificar as lâminas e os componentes mecânicos e elétricos	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar a proteção contra raios e o aterramento

¹³ LIDAR (*Light Detection And Ranging*) é uma espécie de “radar de luz” que utiliza um feixe de raios laser para detectar a distribuição espacial da temperatura e da umidade na atmosfera.

ENERGIA	IMPACTO	POTENCIAIS VULNERABILIDADES	EXEMPLOS DE OPÇÕES DE ADAPTAÇÃO
SOLAR	Temperaturas médias mais altas	Temperaturas médias mais altas melhoram a eficiência do aquecimento solar (especialmente em regiões mais frias), mas reduzem o desempenho de conversão dos módulos fotovoltaicos A eficiência solar fotovoltaica diminui em ~0,5% para cada 1°C de aumento da temperatura do silício cristalino e dos módulos de filme fino A exposição ao calor no longo prazo provoca um envelhecimento precoce do material	<ul style="list-style-type: none"> Dependendo da relação entre o valor da eletricidade perdida e os custos das opções de resfriamento, pode justificar a instalação de resfriamento para reduzir as perdas de eficiência
	Variação da nebulosidade	O aumento da cobertura de nuvens reduz o desempenho e a produção de todos os tipos de tecnologia solar Diminuir a cobertura de nuvens é benéfico (aumento da produção de energia)	<ul style="list-style-type: none"> Cobrir os painéis fotovoltaicos com uma superfície áspera para que eles possam usar melhor a luz difusa Ajustar o ângulo da montagem fixa para melhorar o uso da luz difusa Instalar sistemas de rastreamento para otimizar o ângulo para luz difusa Estender a capacidade de armazenamento para plantas CSP¹⁴
	Ondas de calor	Temperaturas extremamente quentes causam danos materiais aos painéis fotovoltaicos e reduzem a geração de energia em painéis fotovoltaicos e usinas CSP	<ul style="list-style-type: none"> Instalar resfriamento passivo (fluxos naturais de ar) para painéis fotovoltaicos ou aplicar resfriamento ativo por ar forçado ou refrigerantes líquidos
	Tempestades	Ventos fortes podem causar danos materiais para todas as tecnologias solares Os detritos carregados pelo vento podem prejudicar as superfícies dos coletores	<ul style="list-style-type: none"> Reforçar as estruturas de montagem e suporte e as superfícies sensíveis do coletor
	Raios	Raios podem danificar o inversor dos painéis fotovoltaicos	<ul style="list-style-type: none"> Aumentar a proteção contra raios do local e dos painéis

Fonte: adaptado de IAEA (2019).

Com relação aos segmentos de transmissão e distribuição de energia elétrica, eventos climáticos extremos como tempestades de gelo, ventos fortes, enchentes e raios são as principais causas de interrupções de energia (Fant, 2020). Estes fenômenos podem resultar em faltas na rede elétrica, visto que (Ward, 2013):

- ventos fortes podem ocasionar a derrubada de árvores ou destroços em linhas, ou até a derrubada das torres de transmissão e postes de distribuição;
- neve e gelo podem se acumular nas linhas aéreas, nas torres e nos postes, ocasionando maior estresse nessas estruturas, incluindo o colapso das estruturas, especialmente quando combinadas com ventos fortes;
- os gases ionizados resultantes de raios próximos ou diretamente sobre as linhas aéreas podem produzir curtos-circuitos, causando a sua desconexão pelos sistemas de proteção. Além disso, aumentos de tensão causados pelos raios podem trafegar nas linhas, causando danos em equipamentos conectados à rede;
- chuvas fortes estão associadas com ventos fortes e raios, sendo estes últimos os principais causadores de falhas na rede. Há também a possibilidade de a chuva causar curto-circuito nos isoladores, podendo este risco ser reduzido pelo projeto do isolador.

¹⁴ Concentrated Solar Power (CSP) é uma tecnologia que transforma irradiação solar direta em energia térmica e, subsequentemente, em energia elétrica.

- chuvas fortes prolongadas podem causar enchentes e deslizamentos de terra. Apesar de enchentes em geral não ocasionarem falhas em redes aéreas, estes fenômenos podem gerar falhas em equipamentos de manobra, transformadores e cubículos terrestres dentro de subestações.
- deslizamentos de terra e avalanches podem resultar em danos em linhas aéreas e subterrâneas, mas o maior impacto esperado é o dano em subestações e centrais de controle; e
- secas não ocasionam danos significativos em sistemas de transmissão e distribuição, visto que estes não dependem de água para a sua refrigeração. Os impactos esperados da seca são no aumento do risco de incêndios. A fumaça advinda do fogo pode causar arcos em linhas aéreas devido à ionização do ar. O fogo perto de linhas aéreas pode queimar postes de madeira e causar danos nos condutores e isolantes.

Além disso, o aumento da temperatura ambiente resulta em impactos nos ativos de transmissão e distribuição. Um primeiro fenômeno é a redução da capacidade de condução de energia elétrica e aumento das perdas. Isso se dá pelo aumento da resistividade elétrica da rede devido ao aumento da temperatura. Um segundo fenômeno é o da dilatação das linhas de transmissão, o que reduz a distância entre as linhas e as árvores abaixo delas. O “afundamento” (“sag”) das linhas também afeta a sua capacidade de transmissão, que é reduzida para evitar curtos-circuitos de alta tensão entre os condutores e as árvores (IAEA, 2019).

Faltas devido a estes eventos ocorrem em menor escala em linhas de transmissão, visto que sistemas elétricos usualmente consideram um nível de redundância para aumentar a confiabilidade na transmissão de energia. Uma vez que linhas de baixa tensão na distribuição de energia apresentam um nível de redundância menor, faltas nestas infraestruturas resultam em desligamento de blocos de consumidores, usualmente em um ramal reduzido (Ward, 2023).

Tabela 2 – Impactos e opções de adaptação das mudanças climáticas e eventos extremos para a transmissão e distribuição de energia elétrica

IMPACTO	POTENCIAIS VULNERABILIDADES	EXEMPLOS DE OPÇÕES DE ADAPTAÇÃO
Mudança no vento (densidade de energia eólica)	Picos de velocidade de vento extremos podem causar danos mecânicos às torres, linhas e postes. O movimento das linhas energizadas pode provocar descargas elétricas. A queda de árvores e destroços pode causar danos mecânicos indiretos e curto-circuitos.	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustar padrões de carga de vento em projetos futuros. • Redefinir rotas das linhas em áreas abertas e ao longo de estradas. • Programar poda regular das árvores. • Investir em ferramentas de previsão de tempestades e furacões. • Considerar o uso de linhas subterrâneas.
Raios	Raios podem causar falhas por descargas elétricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar fio terra nas linhas energizadas e subestações. • Utilizar centelhadores e pára-raios.
Calor extremo	O ar quente ambiente pode aumentar as perdas na transmissão de energia. A expansão dos cabos pode causar descargas elétricas nas árvores abaixo dos condutores. Linhas e transformadores podem se sobreaquecer e ser desligados.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar capacidade do sistema para compensar as perdas. • Aumentar a tensão física nos cabos para reduzir o afundamento. • Melhorar o resfriamento passivo ou utilizar resfriamento ativo nos transformadores.
Frio extremo	Acúmulo de gelo nos isoladores, equipamentos de manobra e transformadores podem causar descargas elétricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar o projeto dos isoladores.
Aumento da frequência e intensidade de tempestades	Chuvas fortes podem causar faltas por descargas elétricas nos isoladores e curto-circuito nos disjuntores.	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar o projeto dos isoladores. • Aumentar a frequência das manutenções dos componentes sob risco.
Eventos simultâneos de extremo frio, tempestades, chuvas ou neve e tempestades de gelo	A combinação destes fenômenos pode causar acúmulo de neve e gelo, e os fortes ventos podem deformar, danificar ou até derrubar torres de transmissão e linhas aéreas. O acúmulo de neve e gelo em árvores podem derrubá-las sobre as linhas de distribuição.	<ul style="list-style-type: none"> • Modificar o projeto de acordo com a carga de gelo e vento. • Redefinir o trajeto das linhas para áreas com menor exposição. • Melhorar os métodos de previsão de chuvas e gelo em áreas vulneráveis.
Enchentes causadas por chuvas fortes ou tempestades	Enchentes podem causar danos em equipamentos terrestres e sob a superfície (subestações e transformadores).	<ul style="list-style-type: none"> • Definir, quando possível, locais das instalações fora de áreas de perigo. • Melhorar o projeto dos isoladores.
Deslizes de terra e avalanches causados por chuvas fortes e nevascas	Deslizes de terra e neve podem danificar linhas aéreas, cabos subterrâneos, subestações e outros componentes.	<ul style="list-style-type: none"> • Definir, quando possível, locais das instalações fora de áreas de perigo. • Construir sistemas de controle de avalanches. • Usar configuração da rede em malha dentro das áreas de perigo.
Fogos florestais causados por secas	O fogo pode danificar linhas aéreas e postes de madeira. A fumaça e as partículas da queimada podem causar descargas elétricas.	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar os riscos na definição do trajeto da linha. • Melhorar o controle e a poda da vegetação nas áreas próximas às linhas de transmissão e distribuição.

Fonte: IAEA (2019)

De acordo com o Guia de Planejamento para Resiliência do Setor Elétrico (NREL, 2019), o fornecimento de eletricidade confiável, segura e acessível é essencial para impulsionar o crescimento e o desenvolvimento econômico. É fundamental que os formuladores de políticas públicas, planejadores e operadores protejam seus sistemas, planejem e invistam na melhoria da resiliência do setor elétrico em seus países.

Entende-se por 'resiliência do setor elétrico' a capacidade de antecipar, preparar e adaptar-se a condições de mudança no clima e resistir, responder e recuperar-se rapidamente de interrupções no setor elétrico por meio de planejamento adaptável, holístico e de soluções técnicas (NREL, 2019). A redundância¹⁵ e a diversificação de fontes de energia são essenciais para se obter resiliência, e ambas exigem um planejamento interativo onde os planos evoluem à medida que os contextos e as ameaças mudam.

O Guia da NREL (2019) descreve que o planejamento para a resiliência do setor elétrico pode ocorrer em diferentes escalas (local, regional ou nacional) e deve ser incorporado ao planejamento e às políticas existentes do setor de energia para garantir sua eficácia. As principais etapas do processo de planejamento de resiliência do setor elétrico para se obter resiliência são:

1. **Envolver as partes interessadas:** Incluir tomadores de decisão (*stakeholders*), empresas, governos para aprimorar as estratégias, divulgá-las e garantir a adesão;
2. **Coletar dados:** Identificar sistemas e recursos de energia necessários, lacunas e vulnerabilidades e impactos provenientes de falhas no sistema;
3. **Avaliar ameaças e vulnerabilidades:** Definir e avaliar as ameaças e vulnerabilidades, seus impactos e probabilidades de ocorrência;
4. **Desenvolver estratégias:** Identificar e priorizar soluções para abordar vulnerabilidades e incorporar orientações aos planos existentes do setor elétrico;
5. **Aprovar políticas de implementação:** Adotar políticas para obter todos os benefícios das estratégias de resiliência do setor elétrico e coordenar sua implementação;
6. **Avaliar:** Definir quais ações são eficazes e dar suporte para atualizações periódicas.

Em 2020, o estado da Califórnia atualizou seu Guia de Planejamento para Adaptação (APG¹⁶), um arcabouço que fornece orientação para apoiar comunidades a lidar com as consequências das mudanças climáticas. O APG fornece orientação aos governos locais sobre adaptação local e planejamento resiliente por meio de um processo passo a passo atualizado que as comunidades podem utilizar para se planejar em relação às mudanças climáticas, sempre considerando as medidas adaptativas que melhor se ajustem a sua realidade. O APG também contempla fases do processo de planejamento para adaptação muito semelhantes às apresentadas pelo NREL (2019).

De acordo com IPCC (2023), o progresso no planejamento e implementação da adaptação foi observado em todos os setores e regiões, gerando múltiplos benefícios. A crescente conscientização pública e política dos impactos e riscos climáticos resultou no desenvolvimento de medidas de adaptação em pelo menos 170 países e muitas cidades, incluindo a adaptação em suas políticas climáticas e seus processos de planejamento.

Na 4ª Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC, foi apresentado um conjunto de opções de adaptação para lidar com os efeitos negativos da mudança do clima que também contribuem para o desenvolvimento sustentável e a melhoria do bem-estar da população no país. As ações de adaptação podem ser sinérgicas entre si ou representar *trade-offs*, o que deve ser considerado na formulação de políticas públicas no contexto de mudanças climáticas (MCTI,

¹⁵ Redundância é a inclusão de recursos adicionais além daqueles necessários para as operações diárias que podem ser utilizadas em caso de falha em outros componentes (NREL, 2019).

¹⁶ Acrônimo do termo em inglês *Adaptation Planning Guide*.

2020). No que tange à segurança energética, o relatório apresenta como soluções adaptativas o incentivo à geração de energia elétrica descentralizada, a complementariedade entre fontes de geração elétrica (como as fontes hídrica-eólica e eólica-solar), o melhoramento genético de espécies bioenergéticas, a maior eficiência na conversão e uso da energia e a biomassa.

O “Protocolo do Comitê de Vulnerabilidade de Engenharia de Infraestrutura Pública” ou “PIE-VC”¹⁷ funciona como uma ferramenta de gerenciamento de risco climático e foi aplicado no âmbito de duas linhas de transmissão da Eletrosul e do Porto de Itajaí, em Santa Catarina (Castro, 2020; Jardewski, 2020). As principais medidas de adaptação elencadas em ambos os estudos incluíram os sistemas de alertas climáticos e a melhoria e ampliação das redes de monitoramento do clima, demonstrando a importância da disponibilização de dados climáticos atualizados e precisos para auxiliar no planejamento das estratégias adaptativas.

As principais barreiras à adaptação são: recursos limitados, falta de envolvimento do setor privado e dos cidadãos, mobilização insuficiente de financiamento (inclusive para pesquisa), baixa conscientização sobre as questões climáticas, falta de compromisso político, pesquisa limitada e baixo senso de urgência. Existem disparidades cada vez maiores entre os custos estimados de adaptação e o financiamento alocado para adaptação. O financiamento da adaptação veio predominantemente de fontes públicas, sendo que uma pequena proporção do financiamento climático global foi direcionada para a adaptação e uma esmagadora maioria para a mitigação (IPCC, 2023).

A eficácia da adaptação, incluindo opções com base no ecossistema e a maioria das opções relacionadas à água, diminuirá com o aumento do aquecimento. Com o aumento do aquecimento global, as perdas e danos, fortemente concentrados em populações vulneráveis, serão cada vez mais difíceis de se evitar. Ações que focam em setores e riscos isoladamente ou em ganhos de curto prazo muitas vezes levam a uma má adaptação no longo prazo, criando vulnerabilidade e riscos de difícil superação. A má adaptação pode ser evitada por meio de: a) planejamento flexível, multissetorial e de longo prazo; e b) implementação de ações de adaptação com benefícios para muitos setores e sistemas.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2023), os serviços meteorológicos e climáticos (W&CSs¹⁸) desempenham um papel crucial no processo de descarbonização. Como a geração de energia solar e eólica são altamente dependentes das condições climáticas (radiação solar e velocidade do vento), a previsão precisa do clima e sua modelagem ajuda o operador do sistema elétrico a prever a quantidade de energia que será gerada por essas fontes e permite que ele gerencie a integração destas fontes com a rede e reduza a necessidade de geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis.

Além de ajudar a otimizar a operação de sistemas de energia renovável, os W&CSs também podem desempenhar um papel importante no planejamento e desenvolvimento de novos projetos. Por exemplo, o mapeamento de recursos eólicos e solares com base em dados históricos ajuda a identificar os locais mais adequados para parques eólicos e solares. Os W&CSs também podem desempenhar um papel importante no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia, que são críticos para o sucesso da transição energética global, uma vez que tais sistemas podem ajudar a suavizar as flutuações na geração de energia a partir de fontes renováveis variáveis e garantir o fornecimento confiável de energia.

¹⁷ Acrônimo do termo em inglês *Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee*.

¹⁸ Do termo em inglês *Weather and Climate Services*.

5 RUMO À DESCARBONIZAÇÃO

O caminho da descarbonização envolve a análise e compreensão de três tópicos interrelacionados:

- a precificação de carbono;
- o compromisso *Net Zero*; e
- a avaliação de ameaças e oportunidades.

5.1. PRECIFICAÇÃO DE CARBONO

Apontada por Stern (2006) como “o primeiro e essencial elemento de políticas públicas sobre mudanças climáticas”, a precificação de carbono, do ponto de vista da teoria econômica, visa à internalização dos custos relacionados à emissão de GEEs (a externalidade ambiental), que atualmente tem seus custos arcados pela sociedade e não pelo responsável pelas emissões. A precificação é derivada do princípio poluidor-pagador e tem como um dos objetivos impulsionar a diminuição das emissões de carbono por meio da incorporação de tais emissões nos custos dos produtos e serviços.

Em grande medida, as emissões do setor elétrico resultam do fato de não haver uma sinalização correta do custo das emissões. Conseqüentemente, o valor da energia gerada resulta em um preço não ótimo do ponto de vista social, ou seja, há uma externalidade derivada da produção de energia que é entendida como uma falha de mercado. A fim de sanar essa ineficiência econômica é necessário que se atribua o preço correto aos recursos ambientais, internalizando os custos e ou benefícios ambientais via preços das externalidades. Em outras palavras, é necessário valorar os atributos relativos às emissões de GEEs e incorporá-los ao custo de produção dos respectivos responsáveis (EPE, 2021).

No setor elétrico, além das emissões de GEEs, outros atributos das fontes (despachabilidade, distância do centro de consumo, armazenamento etc.) precisam ter seus custos incorporados para a adequada avaliação das fontes. As fontes de energia têm atributos próprios, que são suas características e as diferenciam entre si. Isso faz com que cada uma tenha um papel distinto e, ao mesmo tempo, complementar na matriz elétrica brasileira. A energia eólica, por exemplo, é renovável e não emite GEEs, mas a sua produção é variável uma vez que não há como gerar eletricidade se não há vento. Uma termelétrica emite gases de efeito estufa, mas pode gerar energia a qualquer momento se o combustível for adequadamente disponibilizado. Ou seja, nenhuma fonte sozinha tem todas as características necessárias para uma ótima operação do sistema elétrico, vindo daí a complementariedade entre as fontes (Instituto Escolhas, 2018).

O Instituto Escolhas (2018) publicou estudo que apresentou uma metodologia para calcular o custo total da geração de eletricidade no Brasil por meio da valoração dos atributos de componentes para cada fonte de geração, além da avaliação da sinergia entre as elas. Os atributos avaliados foram os investimentos e custos de operação, os serviços prestados pela fonte (modulação¹⁹, sazonalidade²⁰, robustez²¹, confiabilidade²²), custos de infraestrutura, subsídios e custos ambientais (emissões de GEEs). Como resultado foi observado que os subsídios são um dos componentes dos custos da eletricidade que distorcem o preço das fontes. O estudo ainda mostrou que nem todo MWh é economicamente igual e o plano de expansão ótimo para o setor elétrico não deve necessariamente selecionar apenas a opção com o menor custo.

19 Capacidade do gerador de atender à demanda de energia ao longo do mês.

20 Capacidade do gerador de atender à demanda de energia ao longo do ano.

21 Capacidade do gerador de produzir energia acima do que foi planejado.

22 Capacidade do gerador de injetar energia rapidamente no sistema para evitar interrupção no fornecimento.

A precificação do carbono pode ser estruturada em dois principais formatos:

- (1) tributo sobre o carbono (*carbon tax*) aplicado diretamente às emissões de GEEs ou ao carbono presente nos combustíveis fósseis; e
- (2) Sistema de Comércio de Emissões (SCE), ou *Emissions Trading Mechanisms*, gênero do qual fazem parte o *cap and trade* e o *baseline and credit* (Baldwin *et al*, 2012).

Tanto a tributação como o SCE são mecanismos econômicos. No primeiro, o preço da emissão de uma tCO₂e_q é definido por uma autoridade competente e, em seguida, o mercado define a quantidade de GEEs emitida. No segundo, cabe a uma autoridade definir a quantidade a ser emitida (o teto ou limite de emissões) para que o mercado defina o preço da tonelada. Ambos se fundamentam na ideia de que a abordagem de ajuste no mercado é a mais efetiva em termos de custo para lidar com este desafio ambiental (FGVces, 2017).

Seja por meio da tributação ou pelo estabelecimento de um sistema de comércio de emissões, a precificação de carbono dá a flexibilidade necessária aos entes regulados, que podem escolher entre pagar o preço de carbono ou reduzir suas emissões, dependendo do custo marginal de abatimento e do preço de mercado (EPE, 2020).

Em relação às vantagens e desvantagens dos dois mecanismos acima, a tributação fornece certeza sobre custos e reduz riscos para os agentes econômicos, mas não garante o resultado ambiental almejado. Já um SCE assegura resultados ambientais (já que estabelece um teto de emissões), mas implica volatilidade de preço e riscos aos agentes econômicos envolvidos (APEC, 2010). A vantagem da tributação é o preço das emissões de CO₂ ser bem definido. O preço pode subir ao longo do tempo, mas é conhecido. Enquanto o preço sobre licenças ou permissões é volátil, já que o número de permissões é fixo e a demanda varia de acordo com o tempo (EPE, 2020).

O Artigo 6º do Acordo de Paris prevê a cooperação voluntária entre os países para a implementação de NDCs (*Nationally Determined Contributions*) para permitir maior ambição nas políticas climáticas, promover o desenvolvimento sustentável e garantir a integridade ambiental. Essa abordagem de cooperação bilateral ou multilateral está no Artigo 6.2, segundo o qual as Partes poderiam optar por cumprir suas NDCs usando transferências internacionais de resultados de mitigação (ITMOs, do inglês *Internationally Transferred Mitigation Outcomes*). As ITMOs pretendem fornecer um referencial para facilitar o reconhecimento de iniciativas internacionais, nacionais, subnacionais e regionais de precificação de carbono. Ou seja, o artigo 6º permite que instrumentos como o Sistema de Comércio de Emissões sejam vinculados a esquemas semelhantes para criar um mercado comum de carbono em nível internacional (EPE, 2020).

Além disso, o artigo 6º permite que as medidas de redução de emissões sejam implementadas em um país, transferidas para outro e contabilizadas para cumprimento das NDCs. Ressalta-se, porém, a importância da robustez dos mecanismos de registro, verificação e contabilização das emissões.

O segundo mecanismo abordado no Artigo 6º (Artigo 6.4) é a proposta de criação de um novo mercado internacional de carbono, supervisionado por um órgão da ONU, para o comércio de créditos de carbono em qualquer parte do mundo. O objetivo principal do mecanismo é incentivar a participação efetiva de toda a economia para promover uma redução geral das emissões globais. Ou seja, o mecanismo busca reduzir as emissões além das NDCs, mesmo considerando um cenário sem o esquema comercial em vigor (IETA, 2019). Tal mecanismo tem sido chamado de Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS), substituindo o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que foi operado sob o Protocolo de Quioto. Assim como o MDL, o MDS foi desenvolvido para promover a redução de emissões de forma concomitante com a promoção do desenvolvimento sustentável.

As abordagens cooperativas definidas no Artigo 6.2 e o mecanismo estabelecido pelo Artigo 6.4 são entendidos como a base para novos mecanismos do mercado internacional de carbono sob o Acordo de Paris.

A COP26 teve como um de seus principais desafios e objetivos a definição das regras para a implementação dos mecanismos de cooperação para cumprimento das metas climáticas nacionais, previstos no Artigo 6º do Acordo de Paris. A conclusão das negociações resultou na disponibilização das decisões que visam a regulamentar os artigos 6.2 e 6.4 do Acordo de Paris²³.

Uma das principais pendências, que foi solucionada, estava relacionada aos mecanismos para evitar a dupla contagem de ITMOs e de créditos de carbono transferidos e comercializados e garantir a integridade das transações. Os ajustes serão aplicados a todas as transações, tanto no âmbito do Artigo 6.2 (abrangendo políticas e medidas adotadas dentro ou fora do escopo da NDC do país) quanto no âmbito do Artigo 6.4.

Outro ponto sobre o qual se esperava uma definição era a transição para a utilização dos créditos de carbono gerados por projetos desenvolvidos no âmbito do MDL, que diz respeito a um mecanismo de flexibilização previsto no Protocolo de Quioto. Ficou acordado que os projetos de MDL poderão ser mantidos desde que requeiram a transição para o novo mecanismo previsto no Artigo 6.4 até 31 de dezembro de 2023, e que seja aprovada pela UNFCCC até 31 de dezembro de 2025. É necessário também que o projeto seja coerente com os critérios estabelecidos pelo Artigo 6.4 do Acordo de Paris e sua regulamentação. Já os créditos do MDL de projetos registrados a partir de 2013 e gerados pré-2021 poderão ser utilizados apenas para cumprimento da 1ª NDC do país e não sofrerão ajustes correspondentes. A possibilidade de projetos de MDL migrarem para o mecanismo do Artigo 6.4 é um ponto relevante para o Brasil, pois o país hospeda muitos projetos de MDL em andamento.

O mecanismo do Artigo 6.4 permite que a cooperação ocorra por meio de projetos a serem desenvolvidos por um país (hospedeiro), cujos créditos serão adquiridos por outro. As atividades deverão ter sua adicionalidade comprovada para fins de emissão dos créditos. Serão consideradas adicionais as atividades que demonstrem não ter ocorrido na ausência dos incentivos do mecanismo e que excedam as reduções de GEEs exigidas por lei ou regulamentação.

No caso brasileiro, o histórico da regulamentação de um mercado de redução de emissões de carbono remonta a 2009, quando foi instituída a Lei nº 12.187 da Política Nacional de Mudança do Clima (Brasil, 2009). Em 2014 surgiu o projeto *Partnership for Market Readiness* (PMR), coordenado pelo Ministério da Economia e pelo Banco Mundial, cujo propósito foi identificar as oportunidades para criação desse mercado em todo o mundo. O PMR Brasil foi iniciado em 2016 e concluiu que seria desejável adotar um instrumento de precificação de carbono como parte da política climática nacional (INSTITUTO E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, 2021). No entanto, em 2021 o Brasil não foi selecionado para a etapa seguinte do projeto e perdeu o incentivo do Banco Mundial para implementação do mercado devido ao atraso em relação a outros países que possuem marco regulatório estabelecido.

Na ausência de um mercado nacional, as soluções setoriais surgiram como alternativa. Mais recentemente a valoração dos serviços ambientais no setor elétrico, com foco específico para as emissões de GEEs, ganhou visibilidade com a tramitação da Medida Provisória (MP) 998/2020, que atribuía ao Poder Executivo federal a responsabilidade de estabelecer “diretrizes para a implementação no setor elétrico de mecanismos para a consideração dos benefícios ambientais relacionados à baixa emissão de gases causadores do efeito estufa”. A MP 998/2020 foi convertida na Lei nº 14.120, em 02/mar/2021 (Brasil, 2021a).

²³ Disponível em COP26 define as regras para o Artigo 6º do Acordo de Paris (mattosfilho.com.br)

No âmbito dessa MP, a EPE foi incumbida pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para atuar no suporte técnico e na facilitação do processo de definição das diretrizes e delineou uma estratégia de atuação baseada em:

- (i) publicação da Nota Técnica “Precificação de Carbono: Riscos e Oportunidades para o Brasil” (EPE, 2020);
- (ii) realização de reuniões e workshops com especialistas e instituições de governo e do setor produtivo; e
- (iii) participação em diálogos técnicos promovidos pela Agência Internacional de Energia (IEA).

Com o intuito de alinhar as expectativas e de iniciar um processo de criação de consenso entre atores e instituições, foram realizadas reuniões técnicas e eventos com agentes do setor energético e outros *stakeholders*. A EPE promoveu debates abertos sobre a Lei nº 14.120/2021 e, com base nas discussões ocorridas, publicou o relatório “Proposta de diretrizes para a consideração de benefícios ambientais no setor elétrico – Lei nº 14.120/2021” (EPE, 2021a). Revisado em 2022, o documento contempla as contribuições da Consulta Pública MME nº 118/2022, onde foram elencadas as propostas para indicar os caminhos mais viáveis para o setor elétrico e proporcionar investimentos no setor.

Em diversos países, instrumentos de precificação de carbono vem surgindo como um fator-chave para mudança dos padrões de investimento e comportamento e para fomentar a inovação tecnológica e em infraestruturas (PANTOJA, 2020). Esses instrumentos podem gerar receitas que garantam a mudança para uma transição sustentável e justa, bem como impactos distributivos suaves e apoio à redução da pobreza (WORLD BANK, CDP & ICAP, 2021).

No Brasil, a implementação de mecanismos de precificação de emissões de GEEs no país está atrasada em relação a boa parte dos países, inclusive na América Latina, e ainda depende da aprovação de arcabouço regulatório adequado.

Esse atraso tem reflexos nas oportunidades oferecidas internacionalmente e nas perspectivas de maior integração comercial do país, uma vez que a precificação de carbono já é um mecanismo adotado por grandes parceiros comerciais (CEBDS, 2021). De acordo com o limite planetário relativo à mudança climática, a janela de ação para redução da emissão de GEEs está cada vez menor e é imperativo que todos os países façam a sua parte para que esse limite não seja ultrapassado e sigamos por um caminho sem volta (STEFFEN *et al.* 2015).

Em relação ao panorama futuro de redução de emissões de GEEs no setor elétrico brasileiro, de acordo com o Plano Decenal 2030 (EPE, 2021b) as emissões totais associadas à produção, transformação e uso de energia elétrica corresponderiam a 8% no fim desta década. A queima dos combustíveis fósseis para geração termelétrica é a maior causa dessas emissões no setor elétrico. Apesar disso, é importante ponderar que a Lei nº 14.120 não prevê a eliminação dos incentivos para uso de fontes emissoras de GEEs. O país, na verdade, tem mantido políticas que sustentam o uso de fontes mais emissoras na matriz elétrica nacional, como o carvão mineral, na alocação dos usos da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), que ainda contempla incentivos e subsídios para a geração de eletricidade por combustíveis fósseis. As diretrizes propostas para implementação dos benefícios ambientais no setor elétrico ainda carecem de refinamento.

A falta de definição de metas, metodologias de mensuração e limites percentuais de emissão, e de um cronograma detalhado de fases para implantação de um projeto piloto conferem um caráter genérico às orientações apresentadas até o momento.

5.2. “NET ZERO”

Net zero é o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. De acordo com o *World Economic Forum*, de forma simplificada, o termo “zero líquido” se aplica a uma situação em que as emissões globais de gases de efeito estufa provenientes de atividades humanas estão em equilíbrio com as reduções de emissões.

No valor zero líquido, as emissões de CO₂ ainda são geradas, mas uma quantidade igual de CO₂ é removida da atmosfera, resultando em aumento zero nas emissões líquidas.

Segundo o WRI, o “zero líquido” será alcançado quando todas as emissões liberadas pelas atividades humanas forem compensadas por meio do florestamento ou reflorestamento (*offset*), armazenamento de carbono no solo, ou também pela remoção de carbono da atmosfera em um processo conhecido como Captura e Armazenamento de Carbono por Bioenergia (BECCS²⁴). BECCS é uma tecnologia de remoção de carbono que envolve a geração de energia usando biomassa e, em seguida, a captura e o sequestro as emissões de CO₂ resultantes (WRI, 2023).

Segundo o IPCC (2023), limitar o aquecimento global causado pelo homem requer emissões líquidas zero de CO₂. As emissões cumulativas de carbono até o momento de se atingir emissões líquidas zero e o nível de redução de emissões de GEEs nesta década determinam em grande parte se o aquecimento será limitado a 1,5°C ou 2°C. Os relatórios científicos mais recentes sugerem que limitar o aquecimento a 1,5°C depende das emissões de CO₂ atingirem o zero líquido entre 2050 e 2060 (Figura 8).

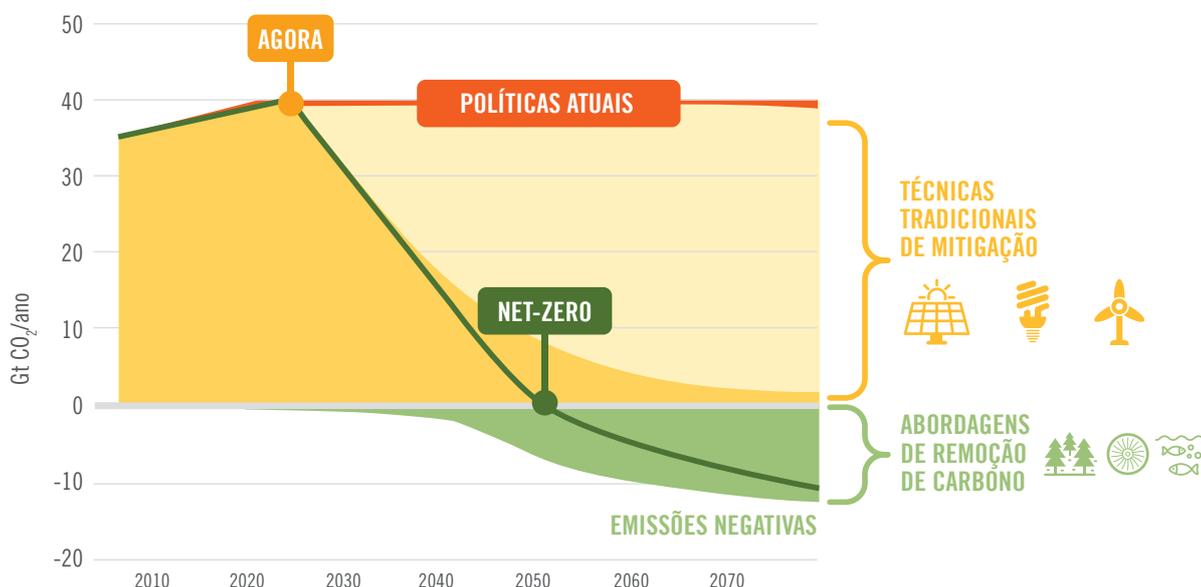
Em função de todas as diferenças e dificuldades existentes entre os países, não é esperado que todos atinjam o *net zero* ao mesmo tempo. Entretanto, para assegurar o limite de aumento de temperatura em 1,5°C, essa meta deve ser alcançada o quanto antes.

Há duas maneiras principais para se reduzir emissões. A primeira delas é diminuir ou eliminar atividades que produzam gases de efeito estufa. No caso de indivíduos, trocar trajetos de carro por caminhadas ou pedaladas é um exemplo de atitude para gerar menos impacto. Empresas comprometidas com *net zero* precisam atentar para o tipo de matriz energética que usam para oferecer seus produtos e serviços, direta e indiretamente. Isso inclui imóveis, rede logística, fornecedores e terceiros.

Se não for possível zerar o impacto reduzindo as emissões, o segundo passo é compensá-las. Isso é possível com o uso de “tecnologias de emissão negativa”. Essas tecnologias incluem diversas maneiras de sequestrar o carbono emitido pelas diversas atividades humanas. O plantio de florestas, por exemplo, promove a captura de um volume significativo de CO₂ da atmosfera. Logo, uma empresa pode calcular suas emissões e plantar árvores suficientes para compensá-las. Outra maneira de compensar as emissões envolve técnicas que retiram carbono da atmosfera – ou impedem sua emissão – por meio de armazenamento.

²⁴ Acrônimo do termo em inglês *Bioenergy Energy with Carbon Capture and Storage*.

Figura 8 – Estratégias de *net zero* para limitar o aquecimento global em 1,5°C.



Fonte: adaptado de WRI (Systems Change Lab).

É importante apontar que ‘neutralidade de carbono’ e ‘*net zero*’ são conceitos diferentes:

- enquanto neutralizar carbono implica diminuir emissões e compensá-las;
- o conceito de *net zero* envolve compensar, também, as emissões indiretas geradas por toda a cadeia produtiva envolvida nas atividades do emissor, o que inclui emissões de fornecedores, terceirizados e até mesmo de clientes.

De acordo com o GHG Protocol, a neutralidade de carbono consiste em compensar emissões pelas quais se é diretamente responsável e emissões relacionadas à compra de energia. Já o *net zero* requer que também sejam neutralizados os bens e serviços adquiridos, além de itens e serviços vendidos ou prestados.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA²⁵), “unidos pelas grandes ambições, os países em todos os estágios de desenvolvimento precisarão determinar seu próprio caminho para implementar o *net zero* de acordo com a diversidade de circunstâncias nacionais e ampla gama de tecnologias disponíveis”. Atualmente, 91 Partes, representando 95 países e 78,9% das emissões globais de GEE, comunicaram uma meta de *net zero* (Climate Watch, 2023).

No relatório “*Net Zero até 2050: Um roteiro para o setor global de energia*” (IEA, 2021), são estabelecidos marcos claros para todos os setores e tecnologias e o que precisa acontecer para transformar a economia global dominada por combustíveis fósseis em uma sustentada por fontes renováveis.

O caminho para emissões líquidas zero é estreito: mantê-lo exige implantação imediata e massiva de todas as tecnologias de energia eficiente e com baixa emissão de carbono disponíveis.

No caminho das emissões líquidas zero (NZE²⁶) apresentadas pela IEA (2021), a economia mundial em 2030 será 40% maior do que hoje e usará 7% menos energia. Aumentar a efici-

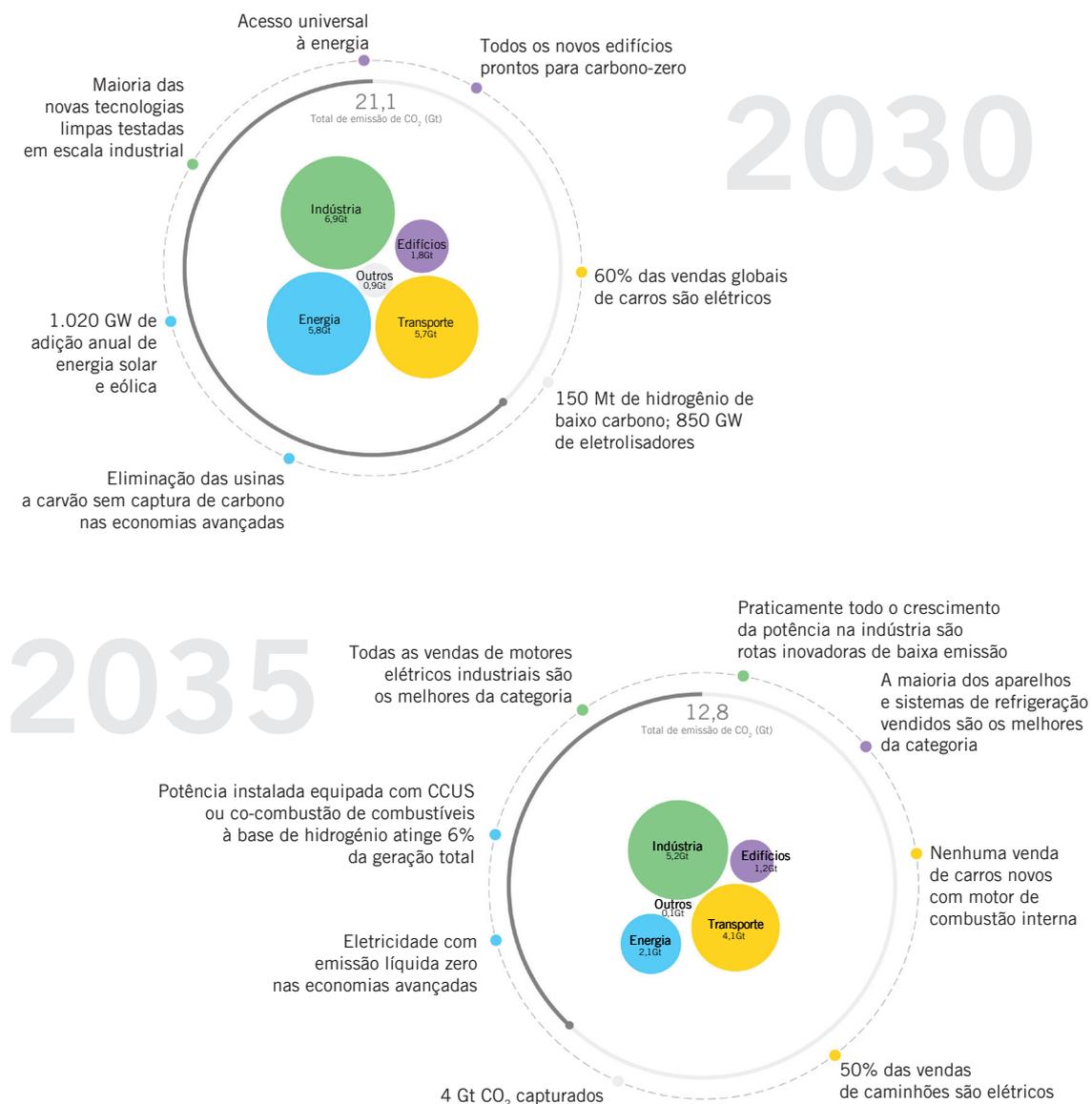
²⁵ International Energy Agency

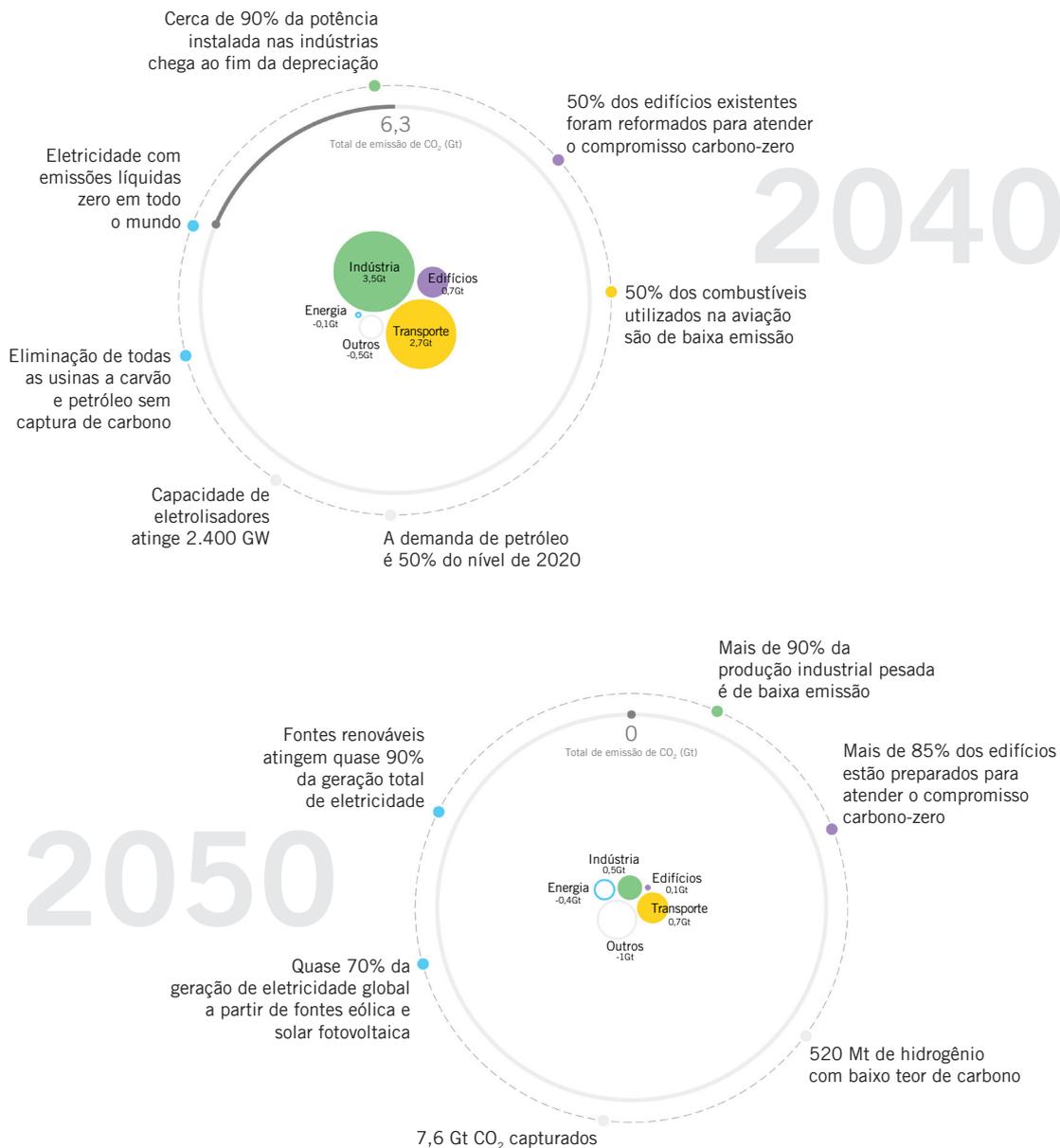
²⁶ Do termo em inglês *Net Zero Emissions*

ênica energética é uma parte essencial desses esforços, resultando na taxa anual de melhorias na intensidade energética em média de 4% até 2030 – cerca de três vezes a taxa média alcançada nas últimas duas décadas. As reduções de emissões do setor de energia não se limitam ao CO₂: no roteiro apresentado, as emissões de metano do suprimento de combustíveis fósseis caem 75% nos próximos dez anos como resultado de um esforço global e concentrado para implantar todas as medidas e tecnologias de redução de emissões de GEEs disponíveis.

As estratégias nacionais de longo prazo para baixas emissões, exigidas pelo Acordo de Paris, podem definir uma visão para as transições nacionais, como o relatório da Agência Internacional de Energia fez a nível global. Estes objetivos de longo prazo precisam estar ligados a metas e políticas mensuráveis no curto prazo. O roteiro detalha mais de 400 marcos setoriais e tecnológicos para orientar a jornada global rumo à neutralidade carbônica até 2050 e alguns dos marcos mais importantes são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Principais marcos descritos no roteiro para descarbonização mundial até 2050.





Fonte: IEA (2021).

No que tange aos estudos para descarbonização, o Banco Mundial publicou em 2023 o Relatório sobre Clima e Desenvolvimento para o País, no qual identificou oportunidades para que o Brasil cumpra tanto os seus objetivos de desenvolvimento quanto os seus compromissos climáticos (Banco Mundial, 2023).

Medidas de monitoramento e fiscalização de custo relativamente baixo para impedir o desmatamento ilegal (de acordo com o Código Florestal) e aumentar as remoções de carbono terrestres e florestais podem reduzir significativamente as emissões. Medidas complementares serão igualmente necessárias para promover a agricultura inteligente em termos climáticos, aumentar a produtividade agropecuária e promover o crescimento diversificado e inclusivo nas zonas rurais por meio de atividades econômicas baseadas nas florestas.

O Brasil está bem-posicionado para criar um sistema de energia resiliente e sem carbono que possa sustentar a descarbonização de setores que têm mais dificuldade para reduzir suas emissões. Isso pode ser feito por meio da eletrificação e da transição para combustíveis sem carbono, tais como o hidrogênio verde. No setor de transportes, é fundamental que haja investimentos e regulamentação tanto para aumentar a eficiência energética e a eletrificação quanto para reduzir a utilização de automóveis com a melhoria do transporte público (Banco Mundial, 2023).

O estudo avaliou três áreas em que as intervenções poderiam ter benefícios particularmente expressivos na redução de emissões de GEE, na exposição a risco climático e no crescimento inclusivo:

- contenção do desmatamento ilegal;
- transição para energia, infraestrutura e transporte mais “verdes” e resilientes para indústrias e setores de transformação; e
- a viabilização de cidades resilientes e de baixo carbono (Banco Mundial, 2023).

A análise incluiu um caminho ilustrativo para zerar as emissões líquidas até 2050 (Figura 10), não sendo o único caminho compatível com a meta de mitigação de longo prazo do Brasil.

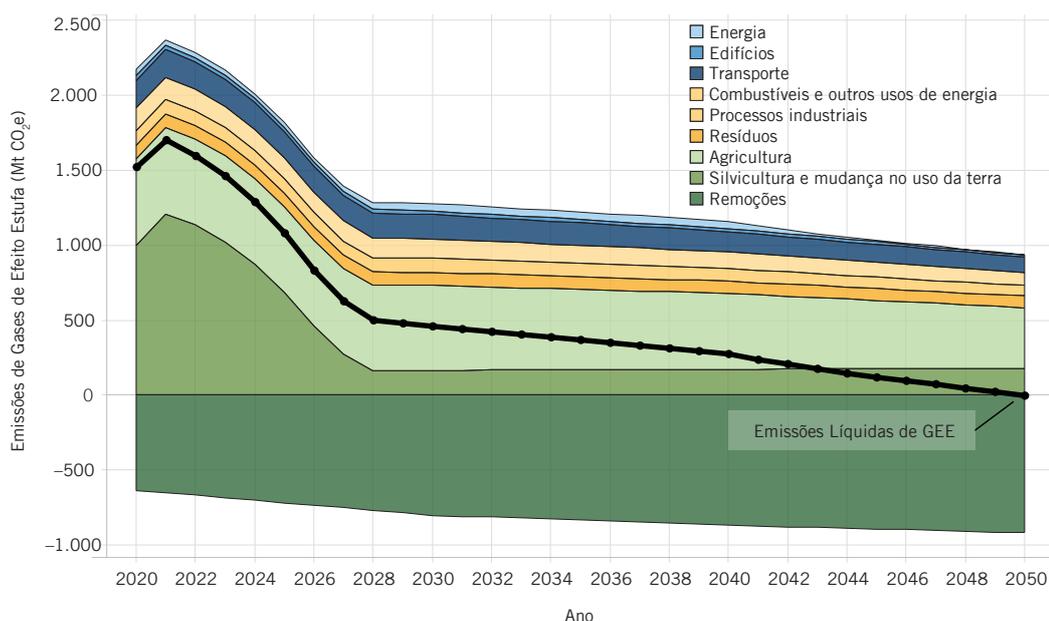


Figura 10 – Emissões e remoções de GEE do Brasil, por setor, de 2020 a 2050.

Fonte: Banco Mundial (2023).

O caminho ilustrativo para o desenvolvimento mais resiliente e de baixo carbono seria uma combinação de alguns elementos-chave:

- Remoção de carbono da atmosfera por meio de mudança no uso do solo: plantações e sistemas integrados de manejo da terra, plantio direto, recuperação de pastagens degradadas, áreas protegidas e terras indígenas, e restauração de florestas nativas e florestas secundárias;
- Desmatamento líquido zero;
- Agricultura mais produtiva, com desmatamento limitado, sendo que o crescimento da produção agrícola após 2028 aconteceria principalmente por meio de ganhos de produtividade

em terras já desmatadas e em áreas disponíveis para o desmatamento legal segundo o Código Florestal;

- Um setor de energia totalmente descarbonizado, com 99% de energias renováveis e 1% de energia nuclear, além da inserção de hidrogênio verde;
- Redução de emissões em todos os setores por meio da eletrificação, mudança de combustível e troca de modais (troca de modais do transporte de carga rodoviário para o ferroviário e fluvial/marítimo, e do uso de veículos particulares para o transporte público nas zonas urbanas).

5.3 DESAFIOS GLOBAIS DA DESCARBONIZAÇÃO

Segundo a Organização Meteorológica Mundial, para atingir a meta de emissões líquidas zero até 2050 o setor elétrico mundial precisará enfrentar desafios nas seguintes dimensões:

- geração de energia;
- demanda por energia;
- rede de energia, que inclui tanto a transmissão quanto a distribuição de eletricidade;
- eficiência energética; e
- inovação, incluindo confiabilidade e estruturação do sistema.

No que tange aos **desafios** voltados à **geração global de eletricidade**:

- A transição de um modelo baseado em combustíveis fósseis para um firmado em fontes renováveis envolve alterações no perfil da oferta de energia. Essas alterações envolvem uma **mudança de paradigma**, uma vez que cada vez mais a geração de eletricidade envolverá um mix de fontes com variação controlada combinadas com fontes de geração variável que dependem da disponibilidade de recursos naturais, como as fontes eólica e solar.
- A geração de energia também exigirá **mais flexibilidade de armazenamento, de comercialização de energia por meio de redes interconectadas e de usinas capazes de oferecer suporte para equilibrar oferta e demanda (como as hidrelétricas)**, sempre buscando a estabilidade operacional do sistema elétrico.

Em relação aos **desafios** associados à **demandas por energia**:

- Os padrões de demanda serão mais complexos e variáveis, e exigirão **novas opções de geração flexível**, o que confere muita importância aos sistemas meteorológicos de monitoramento e previsão do tempo e do clima. Essas previsões precisam ser continuamente aprimoradas para minimizar os impactos e otimizar a integração da energia na rede, uma vez que informações precisas sobre os padrões climáticos atuais e futuros são críticas no dimensionamento de redes de energia e na localização de usinas renováveis.

No que se refere aos **desafios** para adaptação das **redes**:

- Os sistemas de transmissão e distribuição de energia deverão ser capazes de **absorver as variações potencialmente intensas** inerentes à nova conformação de **geração elétrica mais descentralizada** e baseada em **fontes renováveis**.

Sobre os **desafios** associados à **eficiência energética** e à inovação:

- Alguns deles estão vinculados às mudanças no consumo mundial de energia que, por sua vez, serão oriundas de **mudanças de comportamento individuais e coletivas** e da adaptação a novas tecnologias. Mudanças comportamentais incluem decisões deliberadas para limitar o uso individual de energia, além de escolhas de fontes de energia com baixa emissão de carbono.

5.4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES NACIONAIS DA DESCARBONIZAÇÃO

Com 85% de sua matriz elétrica e metade da sua matriz energética renováveis, o Brasil é um dos países com o maior potencial para desenvolver uma economia de baixo carbono e, portanto, **consolidar-se como o país da transição energética**.

No que tange às emissões de GEEs, o Brasil integra o grupo dos 10 maiores emissores do mundo e deve, portanto, assumir compromissos ambiciosos para controlar o aquecimento global. No entanto, diferentemente das grandes economias globais, cujas emissões concentram-se no setor de energia, o setor elétrico brasileiro, com sua matriz de geração predominantemente renovável, responde por apenas 2,4% das emissões totais do país, o que indica que sua relevância pode ser limitada para os esforços de abatimento de emissões do país.

Dessa forma, podemos considerar como **desafios nacionais**:

- **Reduzir adicionalmente as emissões de GEEs no setor elétrico.** Porém, é fundamental enfatizar que, por contar com mais de 80% de fontes renováveis, o Brasil já se encontra próximo do limite de renovabilidade de sua matriz;
- **Reduzir – e eventualmente eliminar – o desmatamento ilegal**, um dos principais desafios e que exige grandes investimentos e apoio na fiscalização dessas áreas.
- **Reduzir as emissões do setor de transportes**, que foi responsável por 47% do total emitido pelo setor de energia em 2021. Nesta dimensão, é importante: (a) considerar políticas públicas de incentivo ao etanol, uma vez que o Brasil já dispõe de plantios de culturas para biocombustíveis para suprir o abastecimento nacional sem que o etanol precise ter o seu preço vinculado ao do petróleo; e (b) mapear as consequências da eletrificação dos transportes para reduzir o impacto do setor com maior emissão de GEE do setor energético;
- **Melhorar a eficiência energética e implementar sistemas de armazenamento** de energia eficientes e escaláveis para lidar com a intermitência das fontes renováveis.
- **Eliminar o carvão mineral da matriz elétrica brasileira.** Esse objetivo corre o risco de ser condenado a uma postergação relevante com a aprovação da Lei nº 14.299/2022, que garantiu a contratação de térmicas a carvão mineral até 2040. Apesar de todas as particularidades econômicas e sociais que estão relacionadas à cadeia produtiva do carvão, principalmente no Sul do Brasil, essa postergação adicionará dificuldades para nossa transição energética. Cabe salientar que a indústria do carvão representa 0,3% das emissões de GEEs no âmbito nacional.
- **Mapear os impactos ambientais da transição energética** para garantir a proteção ambiental durante esse processo, assim como entender a melhor forma de lidar com os desafios socioeconômicos que surgirão com a migração para essa nova matriz, como a criação de empregos na indústria de energias renováveis e a redução de impactos nas comunidades dependentes de combustíveis fósseis, como o carvão mineral.
- **Definir políticas e incentivos para estimular o investimento em tecnologias limpas e sustentáveis no setor energético e fortalecer a pesquisa e desenvolvimento nestas tecnologias.**
- **Planejar uma transição justa do ponto de vista ambiental, econômico e social**, e que garanta o envolvimento de todos os atores públicos e privados para que todos compartilhem dos custos e benefícios da mudança para uma economia de baixo carbono. É fundamental que ninguém fique para trás.

Tais desafios requerem diversas ações e políticas energéticas que permitam ao país atender à demanda crescente por energia, a preços acessíveis, mantendo os indicadores de emissão de GEEs brasileiros à frente da média mundial.

Em relação às oportunidades brasileiras:

- Enquanto o mundo busca alternativas e soluções para viabilizar uma transição energética de uma matriz elétrica predominantemente fóssil para uma limpa e renovável, **os formuladores de políticas públicas nacionais precisam reforçar uma mensagem fundamental perante o mundo: o Brasil já possui uma matriz diversificada e com alto grau de renovabilidade;**
- Dadas as suas vantagens comparativas, **o setor de energia brasileiro pode se beneficiar no caso de um eventual estabelecimento de mecanismo de mercado de carbono internacional no âmbito da UNFCCC.** O fato de o Brasil ter assumido o compromisso de restaurar e reflorestar 18 milhões de hectares de florestas até 2030 vai ao encontro dos objetivos de ampliar as áreas que podem atuar como “sumidouros” de carbono no país.
- É importante realçar que, como a NDC do Brasil seguiu uma abordagem *economy wide* e de caminhos flexíveis, o país pode atingir as metas de redução de emissões de formas mais custo-efetiva, pois estas não estão vinculadas a setores específicos da economia. Assim, **iniciativas de precificação de carbono em nível nacional, envolvendo múltiplos setores da economia, também poderiam ter maior efetividade na mitigação de emissões.** Atividades como transporte, agricultura, uso da terra e indústria, diante da intensidade de carbono que apresentam, são aquelas com maior potencial de contribuição para o alcance da meta de redução de emissões de GEEs no Brasil.
- Portanto, pode-se afirmar que o **setor elétrico brasileiro é um potencial gerador de créditos de carbono**, mas dificilmente seria viável uma política intrasetorial, pois no mercado regulado de energia elétrica a geração não está sob o comando dos agentes, mas sim do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Por outro lado, o setor elétrico brasileiro como um todo seria beneficiado por mecanismos de mercado de carbono intersetoriais ou abrangentes e, principalmente, de mecanismos internacionais.

Em comparação com seus pares, o Brasil está muito bem-posicionado para se beneficiar das tendências globais de descarbonização e tem diante de si uma oportunidade privilegiada para:

- (a) construir resiliência frente às mudanças climáticas;
- (b) alcançar um crescimento econômico mais forte e inclusivo; e
- (c) conseguir zerar as emissões líquidas até 2050.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este *White Paper* explorou os riscos climáticos e as vulnerabilidades do setor elétrico brasileiro frente aos cenários de eventos extremos projetados para as próximas décadas, assim como as medidas de adaptação que podem ser implementadas para conferir maior resiliência à infraestrutura e ao funcionamento do setor. Em uma realidade que já evidencia mudanças climáticas globais, foram discutidos o conceito *net zero* e os desdobramentos do processo de descarbonização por meio da precificação do carbono, indicando os potenciais desafios e oportunidades para o país.

A humanidade está se aproximando de um momento decisivo para os esforços internacionais de enfrentamento da crise climática e a janela de oportunidade de ação está quase se fechando para limitarmos o aumento das temperaturas globais a 1,5 °C. As escolhas e ações implementadas nesta década terão impactos agora e por milhares de anos.

Apesar do número crescente de países que se comprometeram a atingir o *net zero* de emissões de GEEs até meados do século, a lacuna existente entre os discursos e a efetiva implementação das iniciativas continua enorme. Os acordos assinados nas COPs tornam-se promessas vazias quando não há instrumento para acompanhar e validar a realização dos planos de ação. Embora o financiamento climático global tenha crescido desde o AR5²⁷, os atuais fluxos financeiros globais para adaptação, inclusive de fontes públicas e privadas, são insuficientes e restringem a implementação de opções de adaptação, especialmente em países em desenvolvimento (IPCC, 2023).

As fontes despacháveis sob demanda, ou seja, aquelas que podem ser acionadas a qualquer momento, tornam-se necessárias para assegurar o fornecimento de eletricidade nos momentos em que a demanda supera a geração de usinas variáveis. Dentre as tecnologias disponíveis, termelétricas movidas a gás natural apresentam o melhor equilíbrio entre custo e desempenho socioambiental, o que deve garantir sua relevância na matriz elétrica brasileira.

O sistema elétrico global crescentemente precisará de flexibilidade de despacho para complementar a crescente incorporação das fontes de geração variável e de novas tecnologias de armazenamento de energia para compensar a diminuição relativa da capacidade de armazenamento de energia em reservatórios.

As fontes de energia têm atributos próprios que as diferenciam e fazem com que cada fonte tenha um papel distinto e, ao mesmo tempo, complementar na matriz elétrica brasileira. Todas as fontes de energia com as quais se pode contar no Brasil aportam atributos importantes para a matriz elétrica e devem ser valorizadas por suas contribuições do ponto de vista de operação do sistema.

Além disso, como atualmente não há valoração adequada dos atributos das fontes, o preço final não reflete todos os reais custos e benefícios para a sociedade. Dessa forma, o atual modelo simplificado de contratação de energia traz ineficiências e não explicita para gestores e sociedade os verdadeiros *trade-offs* de decisões sobre mudanças na matriz elétrica.

O governo brasileiro ainda não estabeleceu um plano nacional de adaptação com metas e indicadores bem definidos e mensuráveis para auxiliar no acompanhamento e evolução das ações, o que deixa o país vulnerável aos riscos climáticos e compromete o tempo de resposta no caso de eventos extremos. O desafio de limitar o aquecimento global e encontrar formas de adaptar o planeta e tornar as cidades e infraestruturas mais resilientes requer uma transformação global imediata e sem precedentes.

Apesar da elevada presença de fontes renováveis, termelétricas a gás natural manterão sua relevância na matriz de geração, que possui o despacho centralizado pelo ONS. Isso significa

²⁷ Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima)

que um eventual mecanismo de precificação do carbono abrangendo o setor elétrico representaria um custo adicional a uma tarifa de eletricidade já excessivamente onerada por impostos e encargos sem necessariamente levar a redução de emissões de GEEs. Caso seja implementada no mercado de eletricidade brasileiro, a precificação do carbono deve ser analisada com base nas particularidades do nosso setor elétrico, que apresenta características distintas do resto do mundo. Do contrário, corre-se o risco de se criar mais um mecanismo que onera o consumidor final sem trazer os benefícios pretendidos.

Quando analisamos as estratégias propostas pela Agência Internacional de Energia rumo à descarbonização global em 2050, é importante avaliar quais são as implicações para “chegarmos lá”, ou seja, *qual é o caminho para a descarbonização?* Teremos a quantidade suficiente de pessoas para implementar todas as ações necessárias? Teremos matéria-prima suficiente para os cenários de eletrificação projetados para o futuro? Haverá lítio suficiente para produzir todas as baterias necessárias? Em suma, devem-se considerar todas as inúmeras etapas para que as soluções propostas para 2050 funcionem efetivamente.

Na busca para implementar estratégias de proteção climática que sejam efetivas do ponto de vista ambiental, economicamente eficientes e socialmente justas, é necessário dedicar esforços progressivos para resolver uma série de questões operacionais e práticas que muitas vezes não recebem o devido destaque quando se aborda a temática de aquecimento global. Além da mitigação, questões relativas à adaptação, perdas e danos, financiamento, transferência de tecnologia e transparência de ações são fundamentais para o desenvolvimento de planos bem-sucedidos.

Em comparação com seus pares, o Brasil está muito bem-posicionado para se beneficiar das tendências globais de descarbonização e tem diante de si uma oportunidade privilegiada para:

- (a) construir resiliência frente às mudanças climáticas;
- (b) alcançar um crescimento econômico mais forte e inclusivo; e
- (c) conseguir zerar as emissões líquidas até 2050.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnell, N.W. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios, **Glob. Environ. Change** 14, 31–52.
- APEC (2010). **Climate and Fiscal Policy: A Report for APEC** Cooperação Econômica Ásia- Pacífico.
- Baldwin *et al.* (2012). **Understanding Regulation: theory, strategy, and practice**. Oxford: Oxford University Press.
- Banco Mundial (2023). **Relatório sobre Clima e Desenvolvimento para o País (Brasil)**. Disponível em <https://www.worldbank.org/pt/news/infographic/2023/05/08/brazil-country-climate-and-development-report> Acesso em 12 julho 2023.
- Brasil (2009). **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília: Presidência da República [2009]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm Acesso em 15 abri. 2023.
- Brasil (2021). **Lei nº 14.120, de 1o de março de 2021**. Altera a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, a Lei nº 5.655, de 20 de maio de 1971, a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, a Lei nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, a Lei nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013 [...] e dá outras providências. Brasília: Presidência da República [2021a] Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14120.htm Acesso em: 20 maio 2023.
- Brasil (2022). **Lei nº 14.299, de 5 de janeiro de 2022**. Altera as Leis nºs 10.438, de 26 de abril de 2002, e 9.074, de 7 de julho de 1995, para instituir subvenção econômica às concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica de pequeno porte; cria o Programa de Transição Energética Justa (TEJ); e dá outras providências. Brasília: Presidência da República [2022b]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14299.htm Acesso em: 20 jun. 2022.
- California (2020). **California Adaptation Planning Guide**. Governo's Office of Emergency Services.
- Castro, A. G. (2020). Companhia de Geração e Transmissão de Energia Elétrica do Sul do Brasil – CGT Eletrosul. **Relatório Final: Os Efeitos da Mudança do Clima em Linhas de Transmissão da Eletrosul em Santa Catarina**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 239 p.
- Climate Watch (2023). **Greenhouse Gas (GHG) Emissions**. 2023. Disponível em https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2018&start_year=1990 Acesso em: 21 jun. 2023.
- CEBDS (2021). Conselho Empresarial Brasileiro Para O Desenvolvimento Sustentável. **Proposta de marco regulatório para o mercado de carbono brasileiro**.
- CPFL Energia (2020). Projeto de Rede de Distribuição – Cálculo Mecânico. Disponível em: https://www.cpf.com.br/sites/cpf/files/2021-12/GED-3648%20-%20Projeto%20de%20Rede%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20-%20C%C3%A1lculo%20Mec%C3%A2nico_0.pdf. Acessado em 13/11/2023.
- DIEESE (2021). **Carvão Mineral. Experiências internacionais na busca por uma transição energética justa para o setor carbonífero no sul do Brasil**. Publicação baseada na análise Referências internacionais para a redução do uso de carvão mineral como fonte energética das matrizes nacionais, desenvolvida pelo Dieese – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos com apoio do WWF-Brasil. Disponível em <https://www.dieese.org.br/outraspublicacoes/2021/carvaoMineral.pdf> Acesso em 26 junho 2023.

- Di Giulio, G. M.; Torres, R. R.; Lapola, D. M.; Bedran-Martins, A. M.; Vasconcellos, M. da P.; Braga, D. R.; Fuck, M. P.; Juk, Y.; Nogueira, V.; Penna, A. C.; Jacaúna, T.; Fetz, M.; Pessoa, Z.; Pontes, R.; Schons, M.; Premebida, A. Bridging the gap between will and action on climate change adaptation in large cities in Brazil. **Regional Environmental Change**, 19(8), 2491-2502, 2019a. doi: 10.1007/s10113-019-01580-x
- EPE (2020). **Precificação de carbono: Riscos e Oportunidades para o Brasil. Conceitos, experiências e reflexões para a aplicação no setor energético**. Nota Técnica EPE/DEA/GAB/014/2020, 2020. Disponível em: https://abraceel.com.br/wp-content/uploads/post/2021/04/NT-EPE-DEA-GAB-014-2020-Precifica%C3%A7%C3%A3o-de-C_final_05012021.pdf Acesso em 10 maio 2023.
- EPE (2022a). **Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021** / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf> Acesso em 18 maio 2023.
- EPE (2022b). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf Acesso em 10 maio 2023.
- Fant, C.; Boehlert, B.; Strzepek, K.; Larsen, P.; White, A.; Gulati, S.; Li, Y.; Martinich, J. (2020). Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure. *Energy*, 116899.
- FGVces (2018). **Sobre a Simulação do Sistema de Comércio de Emissões**. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/simulacao-comercio-emissoes> Acesso em 10 jul. de 2023.
- Haugen, J.E., Iversen, T. (2008). Response in extremes of daily precipitation and wind from a downscaled multi model ensemble of anthropogenic global climate change scenarios, **Tellus A** 60, 411–426.
- IAEA (2019). **Adapting the energy sector to climate change** / International Atomic Energy Agency. Vienna. <https://www.iaea.org/publications/12338/adapting-the-energy-sector-to-climate-change> Acesso em 20 maio 2023.
- IEA (2021). **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector**. International Energy Agency, Paris. Disponível em <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> Acesso em 14 maio 2023.
- IETA (2019). **Benefits of emissions trading**. Disponível em: <<https://www.ieta.org/resources/Resources/101s/Benefits%20of%20Emissions%20Trading.pdf>> Acesso em 15 jun de 2023
- Instituto Acende Brasil (2017). **O setor elétrico brasileiro no contexto das mudanças climáticas e do Acordo de Paris**. White Paper 17, São Paulo, 24 p.
- Instituto E+ Transição Energética (2021). **Proposta para Definição de Diretrizes para Incorporação dos Serviços Ambientais no Setor Elétrico**. Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Disponível em https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2022/02/E_mais_valorac%C3%A7%C3%A3o-dos-Servic%C3%A7os-Ambientais.pdf
- Instituto Escolhas (2018). **Quais os reais custos e benefícios das fontes de geração elétrica no Brasil?** Disponível em https://escolhas.org/wp-content/uploads/2018/10/Sumario_executivo_energia_SITE.pdf Acesso em 20 junho 2023.
- Iowa State University (2023). Iowa Environmental Mesonet. Disponível em: <https://mesonet.agron.iastate.edu>. Acessado em 13/11/2023.
- IPCC (2021). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/> Acesso em 6 jun. 2022.

- 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. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge, United Kingdom. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2023). **Climate Change 2023. Synthesis Report: Summary for policymakers**. Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> Acesso em 18 maio 2023.
- Jardeweski, C. L. F. (2020). **Relatório Final (Resumo): Levantamento de Risco Climático para o Porto de Itajaí/SC**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 239 p.
- MCTI (2021). **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima** / Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação. 620 p.: iL. ISBN: 978-65-87432-18-2
- MMA (2021). Ministério de Meio Ambiente. Cúpula do Clima: “O Brasil é protagonista nas negociações” diz Ministro de Meio Ambiente em encerramento da COP26. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/201cbrasil-e-protagonista-nas-negociacoes201d-diz-ministro-do-meio-ambiente-em-encerramento-da-cop26>. Acesso em 15/05/2023.
- Mohring, H.D., *et al.* (2004). “Outdoor performance of polycrystalline thin film PV modules in different European climates”, **European Photovoltaic Solar Energy** (Proc. 19th Conf. Paris), EPVSE, Brussels, 2098–2101.
- NREL (2019). National Renewable Energy Laboratory. **Power Sector Resilience Planning Guidebook. A Self-Guided Reference For Practitioners**. Disponível em <https://resilient-energy.org/training-and-resources/publications/73489-guidebook-final.pdf> Acesso em 19 junho 2023.
- ONS (2021). Operador Nacional Do Sistema Elétrico. **Plano de operação energética 2021-2025**. Sumário Executivo. 26p
- Pantoja, S. M.; De Oliveira Valente, P. (2020). **Taxação de carbono: impactos nos indicadores econômicos de projetos de E&P**.
- Pryor, S.C., Barthelmie, R.J. (2010). Climate change impacts on wind energy: A review, **Renew. Sustain. Energy Rev.** 14, 430–437.
- Pryor, S.C., Barthelmie, R.J. (2013). Assessing the vulnerability of wind energy to climate change and extreme events, **Clim. Change** 121, 79–91.
- Pryor, S.C., *et al.* (2011). Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over northern Europe under climate change scenarios, **Clim. Dyn.** 38, 189–208.
- Pryor, S.C., Schoof, J.T. (2010). Importance of the SRES in projections of climate change impacts on near-surface wind regimes, **Meteorol. Z.** 19, 267–274.
- S&P Global (2022). S&P Global Ratings. **Weather Warning: Assessing Countries' Vulnerability To Economic Losses From Physical Climate Risks**. Article. ESG Insights. Disponível em <https://www.spglobal.com/ratings/en/research/pdf-articles/220427-economic-research-weather-warning-assessing-countries-vulnerability-to-economic-losses-from-physical-clim-101529900> Acesso em 19 maio 2023.
- SEEG (2023) **Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**, Observatório do Clima, acessado em 2023 Mapa de Emissões | SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases Acesso em 20 maio 2023.
- Steffen *et al.* (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science** 347, 1259855, 2015.

- UNEP (2022). United Nations Environment Programme. **Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies**. Nairobi. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022> Acesso em 18 maio 2023.
- UNFCCC (2015). **The Paris Agreement**. Disponível em https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em 12/05/2023. Nova Iorque: United Nations Framework Convention on Climate Change.
- UNFCCC (2022). **NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (NDC)**. Disponível em <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>. Acesso em 03/09/2023.
- Vick, B., Clark, R.N. (2005). “Effect of panel temperature on a solar-PV AC water pumping system”, **International Solar Energy Society** (Proc. Orlando, 2005), ISES, Freiburg, 159–164.
- Walter, K., *et al.* (2009) Speed and direction shear in the stable nocturnal boundary layer, **J. Sol. Energy Eng.** 131, 11013-1–11013-7.
- Ward, D. M. (2013). The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. *Climatic Change*, 121(1), 103–113.
- WMO (2023). **Integrated Weather and Climate Services in Support of Net Zero Energy Transition** Best Practices from the WMO Commission for Weather, Climate, Water and Related Environmental Services and Applications. World Meteorological Organization, WMO-No. 1312. Disponível em https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22249#.ZB2xI3bMKUk%C2%A0 Acesso em 30 maio 2023.
- WORLD BANK, CDP & ICAP (2021). **State and trends of carbon pricing 2021**. World Bank, Washington, DC. 2021. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620> Acesso 3 jun. 2022.
- WRI (2022). World Resources Institute. **COP27: Key Takeaways and What's Next**. <https://www.wri.org/insights/cop27-key-outcomes-un-climate-talks-sharm-el-sheikh>.

COMO REFERENCIAR ESTE TRABALHO:

Instituto Acende Brasil (2023). *Estratégias de Adaptação do Setor Elétrico para Eventos Climáticos Extremos*. White Paper 29, São Paulo, 44 p.

Presidente: **Claudio J. D. Sales**

Diretor Executivo: **Eduardo Müller Monteiro**

Diretor para Assuntos Socioambientais e Sustentabilidade: **Alexandre Uhlig**

Diretor de Assuntos Econômicos e Regulatórios: **Richard Lee Hochstetler**

Pesquisa e Desenvolvimento: **Patricia Guardabassi**

Comunicação: **Melissa Oliveira**

Engenheiro: **Joaci Lima Oliveira**

Engenheiro: **João Cho**

Economista: **Fabrizio Lóes**

Assuntos Administrativos: **Eliana Marcon**

ENDEREÇO

Rua Joaquim Floriano, 466
Ed. Corporate • Conj. 501 • Itaim Bibi
CEP 04534-004 • São Paulo • SP
Telefone: +55 (11) 3704-7733

www.acendebrazil.com.br

O Instituto Acende Brasil é um Centro de Estudos que desenvolve ações e projetos para aumentar o grau de Transparência e Sustentabilidade do Setor Elétrico Brasileiro.

Para alcançar este objetivo, adotamos a abordagem de Observatório do Setor Elétrico Brasileiro.

Atuar como um Observatório significa pensar e analisar o setor com lentes de longo prazo, buscando oferecer à sociedade um olhar que identifique os principais vetores e pressões econômicas, políticas e institucionais que moldam as seguintes dimensões do Setor Elétrico Brasileiro:



AGÊNCIAS
REGULADORAS



GOVERNANÇA
CORPORATIVA



IMPOSTOS E
ENCARGOS



LEILÕES



MEIO AMBIENTE
E SOCIEDADE



OFERTA DE
ENERGIA



RENTABILIDADE



TARIFA E
REGULAÇÃO