

# 8 ENERGIA



**Disclaimer:** As opiniões expressas no texto são tão e somente as opiniões dos autores e não expressam, direta ou indiretamente, as opiniões ou posições de suas instituições ou do MMA, PNUMA, IPEA ou FGV, ou demais organizações que participam do GEO BRASIL 2025.

**Para citar este documento utilize:**

MMA, PNUMA, FGV e IPEA (2025). GEO BRASIL 2025: Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil. Rio de Janeiro: FGV e Brasília: MMA. Disponível em:

<https://repositorio.fgv.br/items/f266d8d3-fcba-4ff8-b7c0-6bc4167f56b6> ou

<https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes>

# ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Autores: André Felipe Simões<sup>1</sup>, Flávia Mendes de Almeida Collaço<sup>2</sup> e João Marcos Mott Pavanelli<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Professor Doutor Associado 3 da Escola de Artes Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH/USP) e do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP). Doutor em Planejamento Energético (PPE/COPPE/UFRJ) e Pós-Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos (PSE/FEM/UNICAMP). Email: afsimoes@usp.br

<sup>2</sup> Professora Doutora da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Doutora em Ciências (área de Energia) pela USP. E-mail: flavia.collaco@usp.br

<sup>3</sup> Professor Doutor da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Doutor em Ciências (área de Sustentabilidade) pela USP. Email: joaomarcos@alumni.usp.br

## Sumário Executivo

**O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de energia renovável.** A proporção de energias renováveis na oferta interna de energia primária no país chega a aproximadamente 50%, a mais alta entre os países do G20. A eletricidade é quase toda produzida de fontes menos poluentes e tipicamente renováveis. Destaca-se, porém, que usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis ainda funcionam como resposta aos problemas de intermitência das renováveis.

**Porém, de 2002 a 2023, o setor de energia do Brasil tornou-se mais carbono dependente.** Em 2002, quando da publicação do Relatório GEO Brasil 1, o setor energético do Brasil contribuiu com 11,3% das emissões totais e Gases de Efeito Estufa (GEE) do país. Já em 2023, tal percentual aumentou para 18,3%, denotando que o país está na direção contrária à necessária descarbonização em prol do combate às mudanças climáticas e ao aquecimento global.

**O nexo entre energia e meio ambiente no Brasil é forte.** O país se caracteriza por uma oferta energética tipicamente renovável, porém marcada por impactos ambientais e pressões socioambientais. A sustentabilidade do nexus água-alimento-energia no Brasil depende de o país equilibrar a segurança alimentar interna, a

segurança hídrica, a transição energética justa e a produção agrícola para exportação vis-à-vis pressões socioeconômicas e climáticas.

**A metodologia DPSIR indica que o contexto geopolítico internacional aporta ao Brasil uma crescente pressão em prol da transição energética, mas na condição de supridor global de matérias-primas necessárias à transição energética de países desenvolvidos, e de metas autoimpostas pelos países desenvolvidos na direção de tal transição.** Forças-Motrizas (Driving Forces) apontam que a economia brasileira, em boa medida, se caracteriza pelo setor de agropecuária com participação em alta no contexto do PIB do Brasil, e pelos setores industrial e de serviços em estabilidade. Cabe mencionar que o crescimento populacional brasileiro também se encontra, contemporaneamente, estável.

**As transições energéticas no Brasil se caracterizam por tendências desafiantes.** Fontes menos poluentes e modernas têm reproduzido padrões de exploração de fontes tradicionais (fósseis, hidrelétrica). A ampliação da produção de energia renovável (solar e eólica) em larga escala ocasiona, muitas vezes, despossessão de terras e supressão de culturas e de estilos de vida. Políticas e planos de expansão da oferta energética não estão devidamente transversalizados com as noções de justiça energética. O futuro da

energia para motorização no Brasil tende a ser marcado por uma matriz híbrida, com forte presença de biocombustíveis, eletrificação gradual e avanços no emprego do Hidrogênio Verde (H2V). A atenuação de problemas correlatos à intermitência inerente às fontes energéticas solar e eólicas deve priorizar o armazenamento híbrido (hidrelétricas + baterias + H2V), o qual tende a ser menos custoso e mais eficiente do que tão somente a partir de baterias.

**Maior grau de conexão entre políticas energéticas e ambientais (particularmente, climáticas) é premente em prol de menores impactos do setor energético ao meio ambiente.** Os diversos impactos socioambientais correlatos ao setor

energético do Brasil representam, em boa medida, consequências de padrões históricos estabelecidos pelas usinas hidrelétricas; a atual miríade de externalidades socioambientais negativas não se deve, centralmente, a novas relações causa-efeito, não se deve a novos problemas ambientais decorrentes da produção e do consumo de energia. A justiça ambiental permanece um desafio fulcral para o planejamento energético nacional, exigindo a efetiva participação das populações impactadas nos processos decisórios, a distribuição equitativa dos benefícios e dos impactos dos empreendimentos energéticos, e o fortalecimento de mecanismos de consultas e poderes de veto.

# Introdução

A tríplice crise ambiental — composta pelas mudanças climáticas, pela perda de biodiversidade e pela poluição — representa um dos maiores desafios sistêmicos da contemporaneidade. Como destaca Artaxo (2020), essas três dimensões não são apenas simultâneas, mas profundamente interconectadas, compondo um quadro de colapso ambiental que ameaça as bases biofísicas da vida no planeta.

A crise climática acelera a degradação dos ecossistemas, comprometendo a resiliência da biodiversidade, enquanto a poluição — atmosférica, hídrica e do solo — impacta diretamente tanto a saúde humana quanto o funcionamento dos ciclos naturais. A destruição da biodiversidade, por sua vez, reduz a capacidade dos ecossistemas de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e de depurar poluentes, criando retroalimentações negativas que intensificam ainda mais a crise. Segundo Artaxo (2020), enfrentar essa tríplice emergência exige abandonar abordagens fragmentadas e desenvolver políticas integradas que reconheçam a inseparabilidade entre saúde planetária, justiça ambiental e sustentabilidade socioeconômica.

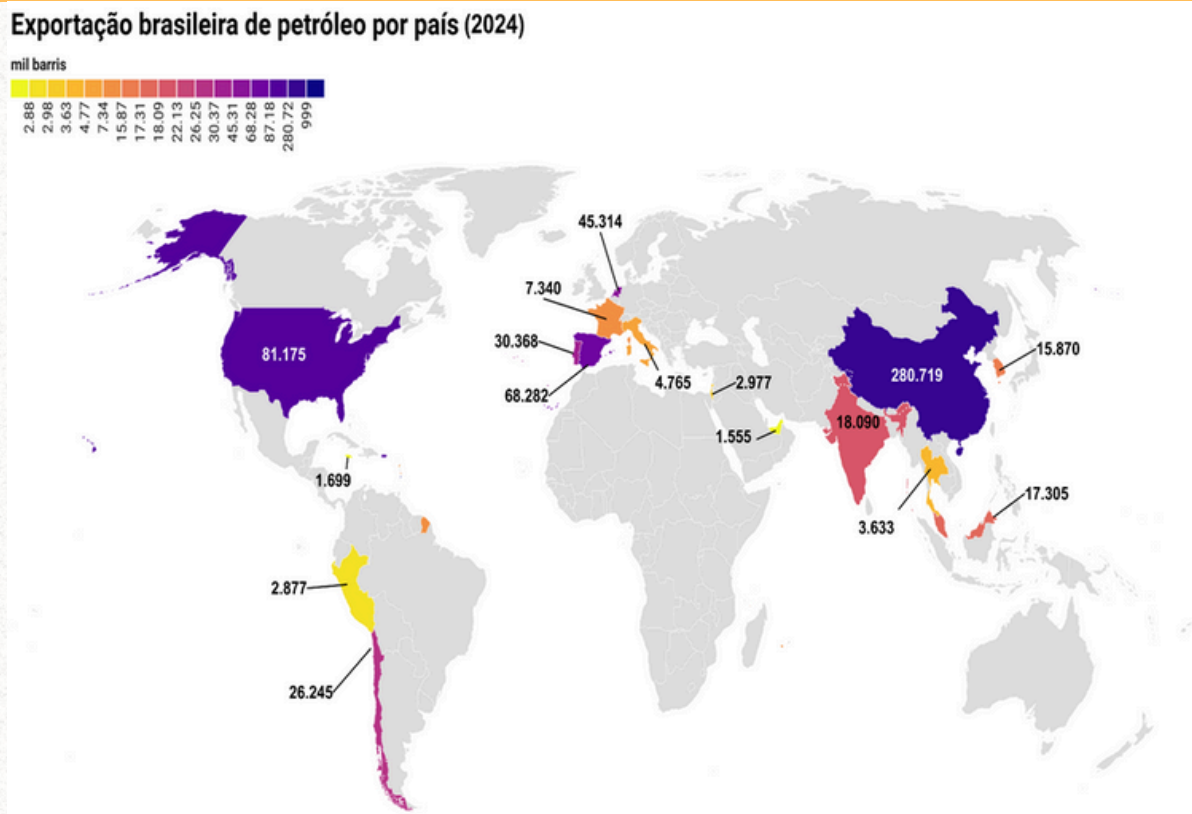
Nesse contexto, discutir a matriz energética brasileira torna-se ainda mais urgente. O Brasil é frequentemente citado como um exemplo mundial no uso de fontes primárias renováveis de energia, devido à elevada participação dessas fontes na sua oferta interna de energia primária. Entretanto, apesar desse protagonismo, é importante ressaltar que quase metade da sua oferta energética ainda é baseada em fontes fósseis

— especialmente petróleo e seus derivados, gás natural e carvão mineral — que, em 2023, representaram 49,5% do total da energia ofertada internamente (EPE, 2024).

Em outras palavras, o país mantém um equilíbrio quase exato entre fontes fósseis e renováveis, uma situação relativamente recente, atingida apenas nos últimos dois anos. Historicamente, a predominância das fontes fósseis foi marcante; e mesmo hoje, o petróleo continua sendo a principal fonte energética da oferta de energia primária do Brasil. Vale destacar que a média mundial de oferta energética proveniente de fontes renováveis é de apenas 14,6% (incluindo a geração hidrelétrica) (EI, 2024), o que torna a situação brasileira particularmente contrastante. No entanto, esse contraste positivo não deve ocultar os desafios persistentes.

No que tange à parcela fóssil, cabe frisar que a maior parte desta oferta energética não renovável se refere à soma de petróleo e seus derivados (35,1%) e gás natural (9,6%), sendo que ambas as fontes energéticas fósseis vêm apresentando tendência de queda na última década na composição da oferta interna de energia, ainda que a produção total de petróleo e gás natural no país venha registrando sucessivos recordes. Frisa-se que, recentemente, fundamentalmente devido à produção petrolífera a partir da camada Pré-Sal, o Brasil se consolidou como um dos principais países exportadores de petróleo do mundo; e exportando tal combustível fóssil para diversos países, conforme evidencia a Figura 8.1. Nesse contexto, destaca-se que, em 2024, o país exportou cerca de 52% de sua produção de petróleo (640 milhões de barris), principalmente para: China, com 44%; Estados Unidos, com 13,7%; e Espanha, com 10,7% (ANP, 2025).

**Figura 8.1 - Mapa de exportação de petróleo brasileiro por país de destino da produção nacional (dados de exportação em mil barris/dia)**

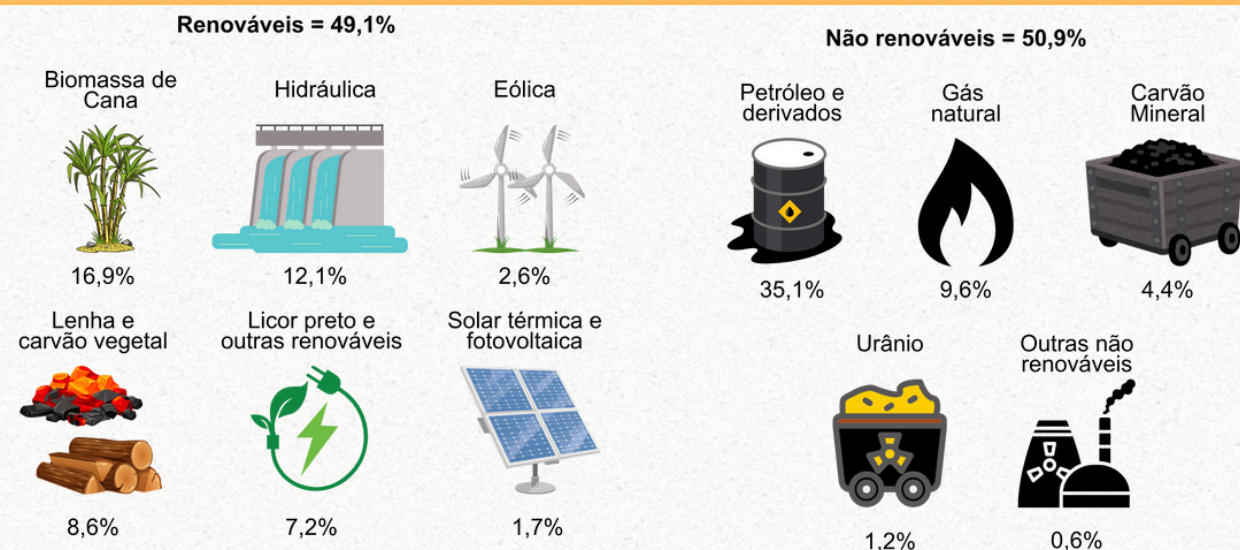


Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da ANP (2025).

Destaca-se, ainda, que, em fevereiro de 2025, a produção de tais energéticos, basicamente devido às atividades de E&P (Exploração e Produção) conduzidas, fundamentalmente, pela Petrobras<sup>1</sup> atingiu o patamar de 4,487 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boe/d), sendo 3,488

milhões de barris petróleo por dia, e 158,76 milhões de m<sup>3</sup> por dia de gás natural (ANP, 2025). Nesse contexto, a Figura 8.2 explicita a participação de cada fonte energética, renovável e não renovável, na oferta interna de energia do Brasil, em 2023.

**Figura 8.2 - Composição percentual para o ano de 2023, por fonte, da oferta interna de energia primária no Brasil**



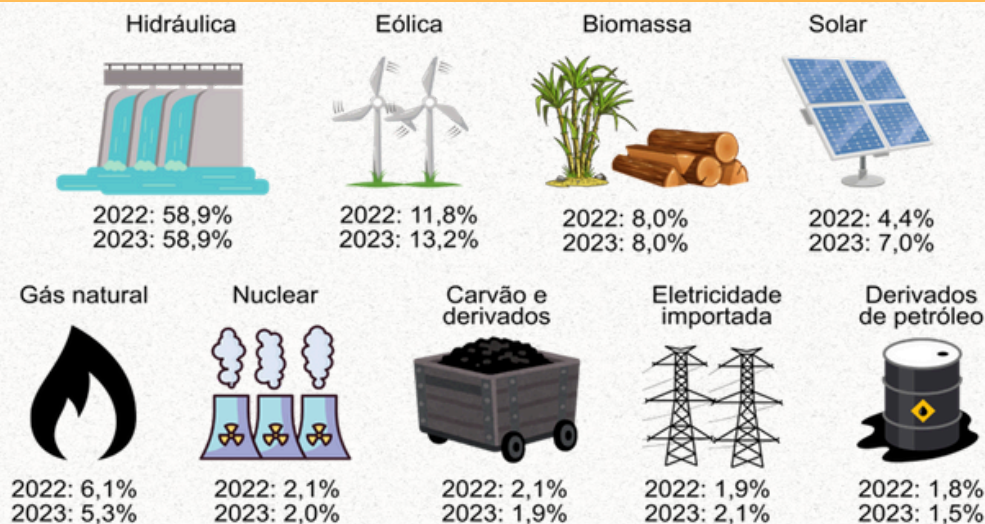
Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da EPE (2024).

<sup>1</sup> A Petrobras, atualmente, opera cerca de 90% da produção total de petróleo e gás natural por meio de consórcios com outras empresas, tais como Shell, TotalEnergies, Equinor, PetroRio, 3R Petroleum, PetroChina, Galp, dentre outras (ANP, 2025b).

A participação de fontes renováveis é mais significativa quando tratamos apenas da oferta interna da eletricidade, conforme ilustrado pela Figura 8.3. O percentual é o mais alto entre os países do G20. Destaca-se,

nesse contexto, que foram registradas quedas na participação de todas as fontes fósseis entre 2022 (total produzido de energia elétrica = 69 TWh) e 2023 (total produzido de energia elétrica = 723,2 TWh) (EPE, 2024).

**Figura 8.3 - Composição percentual, em 2022 e em 2023, por fonte energética, da oferta interna de eletricidade no Brasil**



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da ANP (2024).

Tal cenário coloca o Brasil em uma situação confortável quando comparado aos demais países do mundo, tanto aqueles representativos do Norte Global quanto aqueles caracterizadores do Sul Global. De fato, nos últimos anos o país avançou nos principais rankings mundiais de produção de eletricidade a partir de usinas solares fotovoltaicas e de usinas eólicas. Atualmente, o Brasil possui o 6º maior parque de geração por energia solar do mundo, com 53 GW de potência instalada, e o 5º maior parque do planeta em energia eólica, com 33,7 GW de potência instalada (IRENA, 2025; ABSOLAR, 2025). A região do país que mais se destaca nesse contexto, e de modo bastante expressivo, é a Região Nordeste, que responde por 75% da potência instalada, no Brasil, em energia solar, e por 88% da potência instalada, no país, em energia eólica (EPE, 2025a).

Fundamentalmente nos últimos 10 anos, a geração de eletricidade por meio de usinas hidrelétricas, que por décadas sustentaram a renovabilidade da oferta energética nacional, vem perdendo espaço para a geração por usinas solares fotovoltaicas e eólicas. Isto se deveu aos custos elevados associados a

construção de grandes usinas hidrelétricas (UHE) e, principalmente, aos impactos socioambientais, tipicamente de proporções relevantes, inerentes a tais construções, as quais provocaram e provocam conflitos entre empresas do setor energético e a população local impactada. Tal população, em geral, é constituída por indígenas, quilombolas e comunidades tradicionais da Amazônia, onde se localiza o maior potencial hídrico do Brasil para a instalação das UHE, o qual foi calculado em 100 MW, ou cerca de 50% de potencial hidrelétrico total do país (Junk e De Mello, 1990). O caso da construção do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte, no rio Xingu, inaugurado em 2016, é emblemático nesse sentido, também pelo fato de o Brasil ter recebido críticas intensas no exterior.

Apesar de o Brasil, comparativamente à ampla maioria dos países, não ser relevante emissor de GEE por conta de seu sistema energético, devido às elevadas emissões associadas ao desmatamento e à agropecuária, o país posiciona-se entre os dez países que mais emitem GEE no planeta; o país, em 2022, emitiu 1.537,74 MtCO<sub>2</sub>e (Climate Watch, 2025), sendo que, nesse mesmo ano, acima do Brasil, os maiores

emissores de GEE, em ordem crescente, foram: Rússia (1.821,21 MtCO<sub>2</sub>e), União Europeia (27) (3.060,91 MtCO<sub>2</sub>e), Índia (3.737,4 MtCO<sub>2</sub>e), Estados Unidos (5.604,33 MtCO<sub>2</sub>e) e China (12.715, 91 MtCO<sub>2</sub>e) (Climate Watch, 2025).

Evidentemente, as emissões de GEE chinesas e estadunidenses são proporcionais não apenas às fontes energéticas mais utilizadas nesses países; de fato as emissões de tais países são proporcionais também a seus respectivos colossais consumos energéticos, quando comparados com a ampla maioria dos países (em que se pondere o notável tamanho da população chinesa, que representa cerca de quatro vezes a estadunidense). Dada essa diferença em termos de emissões de GEE entre Brasil e Estados Unidos e China, faz justeza questionar a proporcionalidade das responsabilizações pelos impactos ao meio ambiente, assim como a respeito da efetividade dessas responsabilizações serem autodeterminadas pelas partes, o que é visto como o grande trunfo da COP21, realizada em 2015, em Paris, particularmente no que se refere à concepção do Acordo de Paris. Se, por um lado, as NDC<sup>2</sup> avançaram na ratificação do que fora acordado desde a COP21 acerca da proteção ao clima em níveis nacionais<sup>3</sup>, por outro permitiu que os estados abandonassem estes compromissos assim que outras prioridades (geopolíticas, econômicas ou mesmo em termos de disputas eleitorais) entrassem nas agendas políticas internas.

Por sua vez, a demanda energética brasileira, e do Sul Global como um todo, precisa ser entendida também pelo prisma da geopolítica. Na periferia do capitalismo, os países representativos do Sul Global

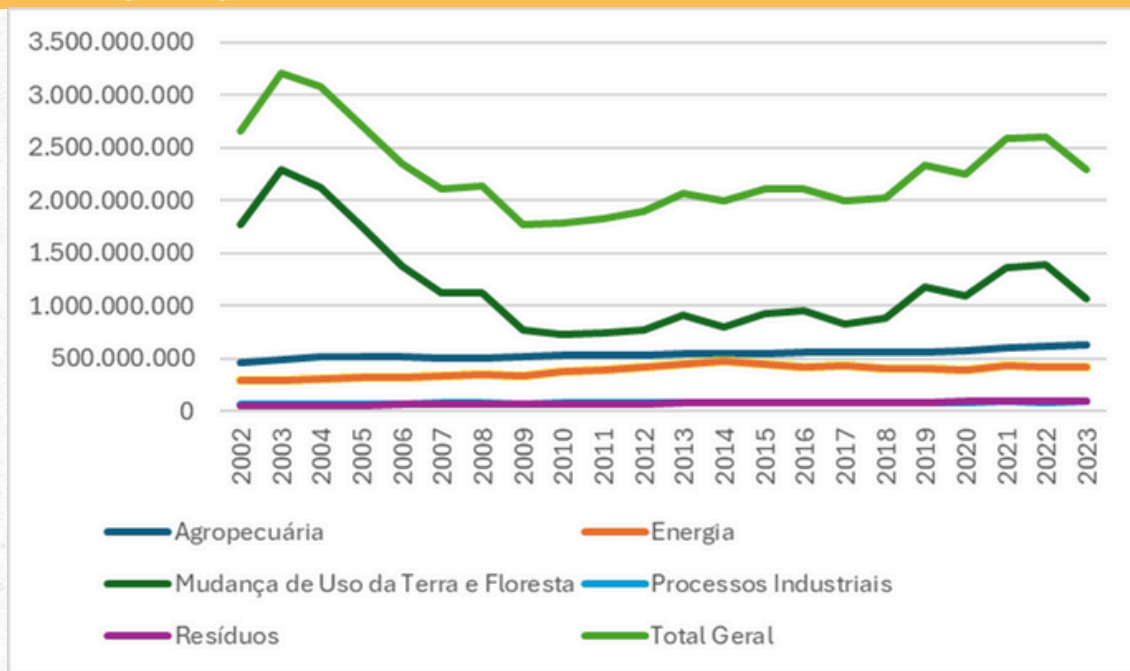
exercem, no que é concernente à divisão internacional do trabalho, a função de exportação de bens primários (commodities de relativamente baixo valor agregado) para países do Norte Global (Fernandes, 1975; Traldi, 2018). Adido à histórica desigual distribuição de renda do Brasil, acaba por implicar em índices agregados, como PIB e produção primária energética, que calculam a intensidade energética de modo imperfeito. Isso significa dizer que muita da energia produzida internamente é enviada para fora, é exportada embutida em produtos primários. Portanto, no caso brasileiro, a análise de dados agregados sobre os usos finais industriais e agropecuários, idealmente, deve considerar tais limitações.

Para fins de complementação deste diagnóstico geral, urge caracterizar a produção e o consumo de energia no Brasil em termos de suas associadas emissões de GEE. Nesse sentido, apresenta-se a Figura 8.4. Destaca-se, pelos dados da Figura 8.4, que, em 2002, quando da publicação do Relatório GEO Brasil 1, a produção e o consumo de energia no Brasil foram responsáveis pela emissão, à atmosfera, de 298.120.476 tCO<sub>2</sub>e, o equivalente a 11,3% das emissões totais de GEE pelo país, em 2002. Já no caso do presente Relatório GEO Brasil 2025 (GEO Brasil 2), considerando recentes dados consolidados (ano de 2023), ressalta-se que o setor energético do Brasil foi responsável pela emissão de 420.067.849 tCO<sub>2</sub>e, o que representou, em 2023, 18,3%, das emissões brasileiras totais de GEE (SEEG, 2024). Destarte, ao contrário da necessária descarbonização em prol do combate às mudanças climáticas e ao aquecimento global, o setor de Energia do Brasil tornou-se, de 2002 a 2023, mais carbono dependente.

<sup>2</sup> NDC significa “Contribuições Nacionalmente Determinadas” (Nationally Determined Contributions, em inglês). As NDCs são os compromissos que cada país assume em prol da mitigação das emissões de GEE e, concomitantemente, visando se adaptar aos impactos das mudanças climáticas, como parte do Acordo de Paris. As NDCs são revisadas a cada cinco anos, objetivando o aumento da ambição climática dos países e alinhar as metas com o limite de 1,5 °C de aumento da temperatura média da superfície terrestre comparativamente a era pré-industrial (ou seja, antes de fins do século XVIII).

<sup>3</sup> E muito devido ao seu caráter legitimista e focado na autodeterminação e soberania dos estados.

**Figura 8.4 - Emissões de Gases de Efeito Estufa pelo Brasil, entre 2002 e 2023, por setores (tCO<sub>2</sub>e)**



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de SEEG (2024).

Diante de tais considerações, o presente capítulo objetiva, em última instância, caracterizar e analisar as inter-relações entre o setor energético do Brasil e as contemporaneidades representativas da questão socioambiental, considerando, para tanto e em especial, os impactos inerentes à produção e consumo de energia ao meio ambiente brasileiro – o qual é marcado por sua vasta biodiversidade, incluindo a maior extensão de floresta tropical do planeta (ou seja, a Floresta Amazônica), amplas reservas de água doce e toda uma gama de biomas (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal e os Pampas) e ecossistemas (tais como os ecossistemas litorâneos Restinga e Manguezal), cada um com especificidades únicas de solo, vegetação, clima, flora e fauna. Frisa-se que este capítulo cotejou, nas análises correlatas às inter-relações entre o setor energético brasileiro e o meio ambiente, as desigualdades socioeconômicas historicamente tão características do Brasil<sup>4</sup>, assim como as especificidades correlacionáveis à energia (produção e, principalmente, consumo) inerentes aos setores energético, residencial, de transporte e industrial do país. Destaca-se

que a rota metodológica adotada no desenvolvimento do presente capítulo baseou-se em pesquisa documental, revisão bibliográfica sistemática e em análises críticas.

Visando o atingimento do objetivo anteriormente citado, o presente capítulo foi estruturado e desenvolvido através das seguintes subseções: 1. Introdução (a presente subseção); 2. Análise da qualidade ambiental do setor energético brasileiro (a próxima subseção, e que se segmenta em 2.1 A Metodologia DPSIR (Driver-Pressão-Estado-Impacto-Resposta) aplicada à qualidade ambiental do setor energético do Brasil; e 2.2 O nexus água-alimento-energia no Brasil); 3. Energia e meio ambiente no Brasil no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável; 4. Transformação verde no contexto do setor energético brasileiro (que se segmenta em 4.1 A Intermitência das fontes renováveis modernas; e 4.2 Panorama H<sub>2</sub>); 5. Principais estratégias e ações voltadas à redução das e ações voltadas à redução das emissões de GEE relacionadas à energia nos setores mais demandantes de tal insumo (a qual se subdivide em 5.1 O setor energético brasileiro e perspectivas de mitigação das

<sup>4</sup> A acentuada desigualdade social típica do Brasil pode ser mais bem compreendida através dos dados da Oxfam, a qual aponta que, no país, os 10% mais ricos concentram quase 59% da renda nacional e os 50% mais pobres detêm uma fatia mínima da riqueza (1% em 2021) (OXFAM Brasil, 2021).

emissões de GEE associadas; 5.2 O uso de energia pelo setor de transporte e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas; 5.3 O uso de energia pelo setor industrial e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas; e 5.4 O uso de energia pelo setor residencial e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas); 6. O setor de energia no Brasil pela perspectiva da justiça ambiental: Análise com foco na necessidade de superação de entraves à Transição Energética Justa; 7 Síntese Analítica; e, por fim, 8. Recomendações prioritárias. Subsequentemente à Subseção 8, apresenta-se a listagem das referências bibliográficas adotadas.

## Análise da qualidade ambiental do setor energético brasileiro

### A Metodologia DPSIR (Driver-Pressão-Estado-Impacto-Resposta) aplicada à qualidade ambiental do setor energético do Brasil

A metodologia DPSIR se refere, sucintamente, a uma estrutura analítica focada na compreensão das complexas inter-relações entre o meio ambiente e a sociedade, sendo útil especialmente na elaboração de políticas públicas ambientais e em avaliações ambientais. No caso do setor de energia, a metodologia DPSIR pode ser relevante, por exemplo, na concepção ou no aprimoramento de arcabouços jurídicos (novas leis, por exemplo), na definição de políticas e regulamentações e na orientação estratégica de investimentos em tecnologias para fomento das energias renováveis.

Com o intuito de tornar mais dinâmica a visualização da metodologia DPSIR aplicada ao setor energético brasileiro vis-à-vis a qualidade ambiental deste setor, apresenta-se a Figura 8.5, a qual explicita

os elementos centrais deste exercício de aplicação da DPSIR ao setor energético do Brasil.

**Figura 8.5 - Esquemática do exercício de aplicação da metodologia DPSIR ao setor de energia do Brasil**



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

### Análise ampliada da aplicação da metodologia DPSIR ao setor energético do Brasil

Cabe frisar, adicionalmente, que em termos de Forças-Motrizes (Driving Forces) poder-se-ia também citar que a economia brasileira, em boa medida, se caracteriza pelo setor de agropecuária com participação em alta no contexto do PIB do Brasil, e pelos setores industrial e de serviços em estabilidade. Outrossim, urge mencionar que o crescimento populacional brasileiro também se encontra, contemporaneamente, estável. Ainda no que tange às forças-motrizes inerentes à metodologia DPSIR, o contexto geopolítico internacional aporta ao Brasil uma crescente pressão em prol da transição energética (mais na condição de supridor global de matérias-primas necessárias à transição energética de países desenvolvidos, ressalta-se) e de metas autoimpostas pelos países desenvolvidos na direção de tal transição; cabe citar, nesse contexto, o acintoso aumento da produção de componentes para implantação de usinas energéticas a partir de fontes renováveis, principalmente chineses, com alta competitividade em relação às fontes fósseis (IRENA, 2024).

No que tange às Pressões (Pressures), cabe destacar, em cenário de médio prazo (entre oito e dez anos, provavelmente), a potencial E&P de petróleo e gás natural em região próxima à Foz do rio Amazonas e

na Margem Equatorial Brasileira. Além disso, nesse mesmo contexto, poder-se-ia mencionar ainda: (a) O armazenamento de gás natural no sul do Estado de Alagoas; (b) O provável aumento do desmatamento no Semiárido brasileiro (Região Nordeste) correlato ao avanço de megaprojetos solares fotovoltaicos e eólicos (principalmente), impactando socioambiental e socioeconomicamente os territórios e suas populações (Traldi, 2018); (c) Conflitos por terra associáveis à expansão de usinas eólicas no Semiárido; (d) Avanço da geração fotovoltaica distribuída capaz de afetar a capacidade de previsibilidade do despacho nacional e dos custos operacionais da rede de distribuição elétrica; (e) A dependência ainda excessiva pela geração de eletricidade a partir das grandes usinas hidrelétricas torna o SIN (Sistema Interligado Nacional) vulnerável a secas e mudanças nos padrões de precipitação (aspectos em mutação devido às mudanças climáticas); (f) Há desafios importantes quanto à sustentabilidade da produção de energia a partir da biomassa (competição com a produção de alimentos e uso excessivo de defensivos agrícolas, por exemplo).

No que se refere ao Impacto (*Impact*), cabe ainda mencionar que a E&P na Margem Equatorial Brasileira pode gerar impactos profundos na população local, bem como aumento das emissões de GEE em nível nacional e global – neste contexto, frisa-se que um cálculo realizado pelo Instituto ClimaInfo, numa análise perpetrada com base em estimativas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024a), aponta que cerca de 4,7 GtCO<sub>2</sub> poderiam ser emitidos à atmosfera, o que representa mais de duas vezes o que todo o Brasil, em 2023, emitiu. E, considerando integralmente a Margem Equatorial, a região no mar entre a costa do Amapá e do Rio Grande do Norte, na qual se localiza a Foz do rio Amazonas, poderiam ser emitidos cerca de 13,5 GtCO<sub>2</sub>, patamar de

emissões que representa mais de cinco vezes tudo que o Brasil lançou à atmosfera, em 2023, em termos de CO<sub>2</sub>, incluindo as emissões inerentes ao setor de energia e àquelas devido ao desmatamento, o principal vetor explicativo das emissões brasileiras de CO<sub>2</sub> (Frighetto, 2025). Nesse contexto, urge também citar: (a) O avanço das usinas solares e eólicas (*onshore e offshore*) compromete estilos de vida locais, potencialmente promovendo psicopatologias e êxodo rural, além de impactos ao patrimônio sociocultural e arqueológico e de oferecer risco de contaminação e estagnação de lençóis freáticos (TRALDI, 2018; Observatório da Energia Eólica, 2019); e (b) O avanço da geração solar fotovoltaica pode gerar subsídios cruzados que tornem a conta de luz mais cara para pessoas em situação de pobreza.

Em nível de Resposta (*Response*), adicionalmente cabe mencionar a premente necessidade de criação de processos de consultas públicas e, concomitantemente, a importância de se considerar cosmovisões locais alternativas sobre desenvolvimento, alocando, inclusive, eventuais poderes de veto para populações marginalizadas, as que, tipicamente, são as mais impactadas pelos processos de geração/exploração, transmissão e distribuição/transporte de energia. Nesse mesmo contexto, são também prementes as seguintes estratégias: (1) Desenvolver amplo debate envolvendo poder público, universidades e comunidades locais que convirja para um arcabouço institucional próprio para o licenciamento de projetos energéticos renováveis<sup>5</sup> que ultrapassem 5 MW de potência instalada, e de modo correlato, fiscalizar e penalizar, exemplarmente, o avanço dos megaprojetos eólicos que desmatem o Semiárido; (2) Debater a Resolução Normativa 482 (RN482), que estabeleceu as condições gerais para acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição e

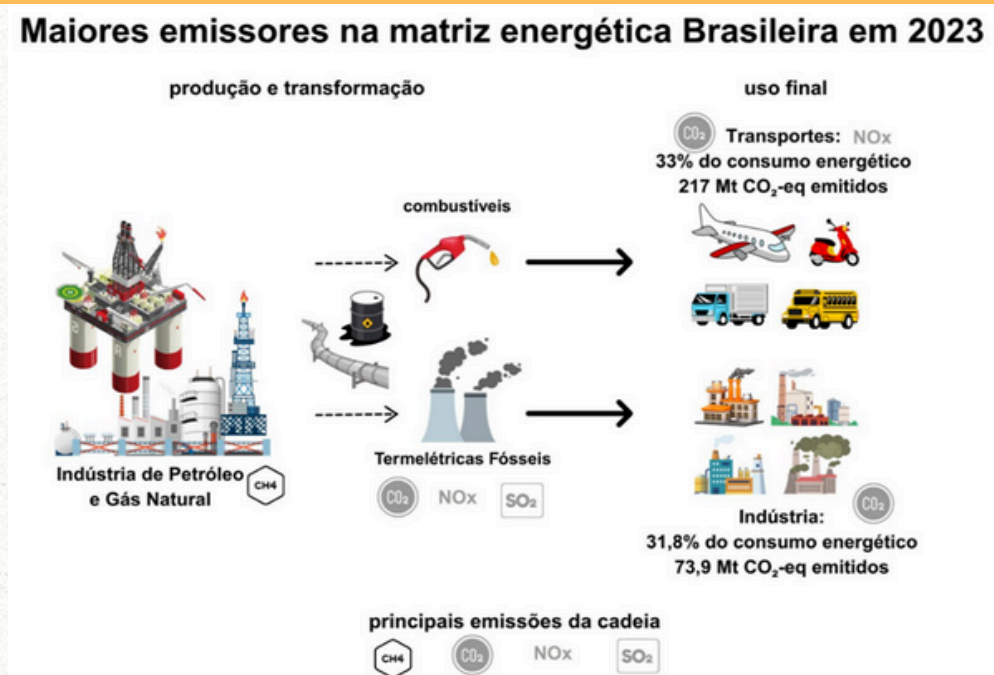
<sup>5</sup> A partir da aprovação da Lei Geral do Licenciamento Ambiental (LGLA), de nº 15.190/2025, empreendimentos energéticos considerados de baixo e médio impacto (tais como reforços de subestações, pequenas e micro usinas hidrelétricas – PCHs – e determinadas usinas solares fotovoltaicas) tendem a experimentar prazos menores e procedimentos simplificados, reduzindo o tempo de desenvolvimento. Esta Lei foi sancionada pelo Presidente Luiz Inácio Lula da Silva em agosto de 2025, após anos de tramitação, com foco na desburocratização e na uniformização dos procedimentos para a emissão de licenças ambientais no Brasil. O texto final, originado a partir do Projeto de Lei (PL) 2.159/2021, aprovado pelo Congresso Nacional, recebeu 63 vetos presidenciais em prol de fomento à segurança jurídica, proteção ambiental e manutenção dos direitos de povos quilombolas e indígenas. Destaca-se, porém, que uma participação mais intensa (ou mais exclusiva) das próprias empresas responsáveis por empreendimentos energéticos na avaliação do que pode, ou não, ser considerado como de baixo e médio impacto pode vir a gerar dificuldades para atingimento dos objetivos dos vetos presidenciais.

compensação de eletricidade, de modo a repensar as compensações futuras de excedentes energéticos, retendo uma parte proporcional da eletricidade para um fundo social para manutenção dos custos tarifários; (3) Mitigar as externalidades negativas associáveis à intermitência inerente à geração de eletricidade a partir das usinas solares e eólicas por meio de desenvolvimento de tecnologias de armazenagem (baterias) ou de bombeamentos, movidos pelo excedente de renováveis, capazes de reabastecer os reservatórios das hidrelétricas. Nesse sentido, ainda que por enquanto signifiquem experiências tipicamente pontuais, *microgrids*<sup>6</sup> podem ser muito mais adotados Brasil, afinal viabilizam a integração da eletricidade gerada a partir de usinas solares e eólicas com armazenamento (sistemas térmicos,

baterias, hidrogênio) e geração complementar por meio de diesel de backup, PCHs, biogás ou biomassa, deste modo, *microgrids* operam garantindo continuidade de fornecimento, além de estabilidade de tensão e frequência.

Ampliando a caracterização e análise da qualidade ambiental do setor energético do Brasil, apresenta-se Figura 8.6, que evidencia os principais setores que contribuíram para as emissões de GEE no contexto da oferta energética primária no Brasil. É possível observar que a indústria de petróleo e gás, que mais polui no setor energético, produz combustíveis fósseis para transportes e para as termelétricas, que por sua vez sustentam a produção e atividade industrial. Para que energia fóssil vire trabalho (transporte e produção) foram emitidos 290,9 Mt de CO<sub>2</sub> equivalente em 2023.

**Figura 8.6 - Principais setores contribuintes para as emissões de GEE no contexto da oferta energética do Brasil, em CO<sub>2</sub>e, relativamente ao ano de 2023**



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de EPE (2024).

Quanto ao Estado (*State*), o qual, em última instância, se refere à condição atual do meio ambiente, considerando aspectos físicos, químicos e biológicos (Exemplos: qualidade da água, níveis de poluição do ar, biodiversidade). Nesse contexto, adicione-se a contribuição relevante do Brasil ao avanço das mudanças climática; conforme analisado anteriormente, o país

está entre os dez principais maiores contribuintes ao avanço das mudanças climáticas e a seu mais proeminente fenômeno, o aquecimento global, pelo porte relativamente vultoso de suas emissões de GEE: 2,3 GtCO<sub>2</sub>e, em 2023 (SEEG, 2024) – tal cenário se associa a diversas negativas externalidades socioambientais e socioeconômicas à população brasileira e

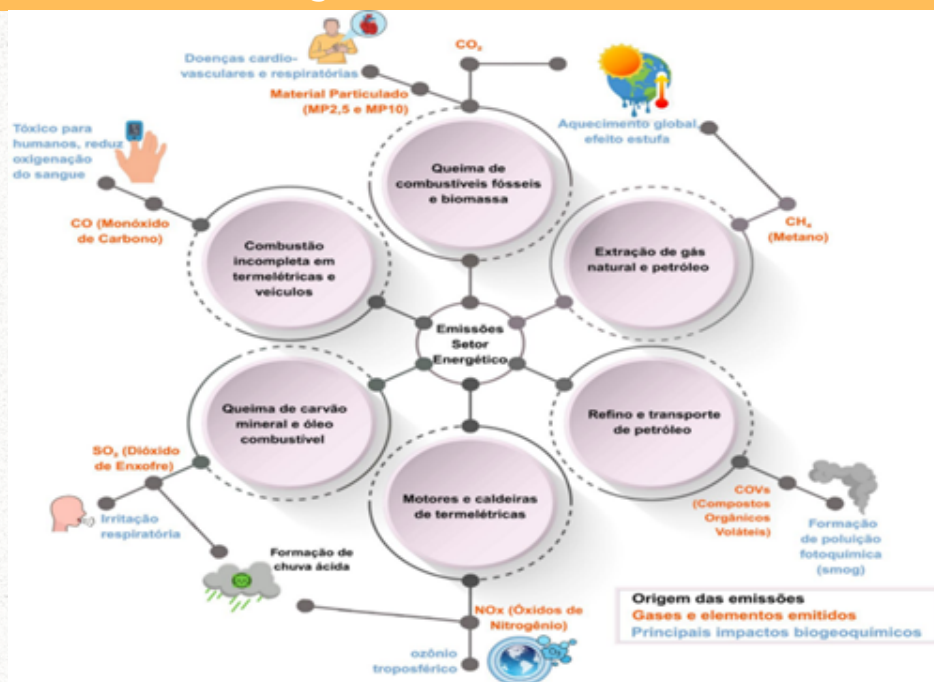
<sup>6</sup> *Microgrids* referem-se a pequenos sistemas de distribuição de energia que podem funcionar conectados de forma independente (no chamado “modo-ilha”) ou diretamente conectados à rede elétrica principal.

aos biomas e aos ecossistemas característicos do país. O contraponto a tal quadro, salienta-se, é que houve avanços recentes (2023 e 2024) no combate e no controle ao desmatamento. No entanto, as recorrentes crises hídricas (as quais vêm sendo agravados pelo avanço das mudanças climáticas, que, por sua feita, induz a episódios de seca grave), e medidas legais que fragilizam a condição geral do meio ambiente no país<sup>7</sup>, indubitavelmente, representam retrocessos importantes.

Para além da emissão de poluentes gasosos, particularmente os GEE, o setor energético brasileiro é responsável por toda uma gama de formas de gerar danos ao meio ambiente. Nesse sentido, deve-se

mencionar os impactos ambientais correlatos à poluição térmica e aquática (alteração de temperatura em corpos d'água por usinas hidrelétricas e termelétricas), a geração de resíduos sólidos e tóxicos (cinzas e escórias de termelétricas a carvão mineral ou óleos e lubrificantes utilizados em turbinas e geradores, por exemplo), os impactos diversos aos ecossistemas, o ruído ambiental, os impactos à saúde e a poluição visual, dentre outros. Nesse sentido, visando ampliar a caracterização, análise e compreensão dos impactos diretos e indiretos do setor de energia do Brasil, apresenta-se a Figura 8.7, que esquematiza tais externalidades socioambientais negativas.

**Figura 8.7 - Principais origens, composição e impactos das emissões de GEE decorrentes do uso de energia no Brasil**



Fonte: Elaborado pelos autores em uso de Inteligência Artificial, 2025. Nota: Os parâmetros e as premissas definidas em prol da elaboração do infográfico em questão foram desenvolvidos pelos autores do presente Capítulo 7.

Cabe mencionar que os impactos socioambientais apresentados pela Figura 8.7 representam, em boa medida, consequências de padrões históricos estabelecidos pelas usinas hidrelétricas; ou seja, tal miríade de externalidades socioambientais negativas não se deve, centralmente, a novas relações causa-efeito, não se deve a novas tipologias de problemas ambientais decorrentes da produção e do consumo de energia. De

fato, a maioria das principais usinas hidrelétricas do Brasil se relaciona à inundação de áreas extensas, ao desmatamento e perda de habitats, a alterações no regime hídrico, à emissão de GEE (afinal, a decomposição da matéria orgânica submersa libera metano e gás carbônico) e a diversos impactos sociais (conflitos territoriais, desapropriações e prejuízos às formas de vida tradicionais, em particular). Nesse contexto, é possível

<sup>7</sup>E, portanto, fomentam a perda de biodiversidade, que, dentre outras externalidades negativas, relaciona-se a maiores vetores à transmissão de doenças.

mencionar, por exemplo, que a UHE de Jirau (RO), inaugurada em 2016, alterou a dinâmica do Rio Madeira (impactando, assim, espécies migratórias como o dourado), causou deslocamentos populacionais e impactos sobre comunidades tradicionais; que a UHE de Tucuruí (PA), inaugurada em 1984, formou um dos maiores reservatórios artificiais do mundo (2.850 km<sup>2</sup>), alagou florestas, causou deslocamento de cerca de 30.000 pessoas, além de ter provocado perda de fauna aquática e de capacidade pesqueira; que a UHE de Balbina (AM), inaugurada em 1989, para gerar relativamente pouca energia elétrica causou o alagamento de uma imensa área de Floresta Amazônica (2.360 km<sup>2</sup>), o que resultou em perda de biodiversidade, aumento da emissão de metano e deslocamento da comunidade indígena Waimiri-Atroari; ou ainda que a UHE de Belo Monte (PA), inaugurada em 2011, um caso paradigmático mundialmente reconhecido de geração de problemas sociais e ambientais, causou a remoção de milhares de famílias habitantes do Município de Altamira e de municípios vizinhos, alterou o regime do Rio Xingu (afetando, assim, populações ribeirinhas e indígenas em suas capacidades pesqueiras de navegação através do Rio Xingu) e provocou perda de biodiversidade aquática e conflitos socioambientais (Lima, 2022; Johansen et al., 2025).

## O nexus água-alimento-energia no Brasil

O nexus em questão refere-se a meios de se caracterizar e analisar as interdependências e inter-relações existentes, ou que podem passar a existir no futuro, entre três setores estratégicos para o desenvolvimento sustentável do país, quais sejam: recursos hídricos, produção e consumo de alimentos, e geração e consumo de energia. No caso do Brasil, o nexus água-alimento-energia, de modo geral, caracteriza-se por pontos positivos fortes e, concomitantemente, por desafios específicos.

O supracitado nexus por ser caracterizado no país pela forte dependência por usinas hidrelétricas (UHE) na composição da oferta interna de eletricidade. As UHE necessitam de grandes áreas alagadas, especialmente quando não são UHEs a fio d'água, as quais não possuem grandes reservatórios e aproveitam a força da correnteza do rio na geração elétrica. Com isto, recorrentemente, ocorre comprometimento de eventual lavoura agrícola, de áreas para pasto e de quaisquer usos do solo, incluindo os modos de vida (*modus vivendi*) das populações locais, as quais, no contexto de construção das UHEs, invariavelmente, têm de ser removidas, o que pode implicar em aumento do êxodo rural e da marginalização populacional em áreas urbanas. A mesma competição por terra vem sendo observada através da espoliação de pequenos proprietários rurais do interior nordestino, particularmente para implementação de novas usinas eólicas. Para além da retirada total de moradores, ainda há problemas com os que (compreensivelmente) se recusam a sair, os quais, dentre outros problemas, são impactados pelo sombreamento constante e pelo contínuo ruído sonoro de operação das pás eólicas, aspectos que afetam a saúde mental, a produtividade agropecuária e a qualidade de vida dessas pessoas (Traldi, 2018). O mesmo quadro é esperado também no caso do avanço da fonte solar fotovoltaica, já sendo possível observar os efeitos deletérios inerentes à competitividade entre geração elétrica e uso de terra para agricultura familiar em países como a Índia, afetando, desproporcionalmente, as mulheres (Stock e Sovacool, 2024).

O nexus água-alimento-energia no Brasil também é emblemático quanto ao uso da terra para produção de biocombustível, especialmente devido às amplas áreas destinadas à produção da cana-de-açúcar, matéria-prima essencial à fabricação do etanol. No Estado de São Paulo, que responde pela maior parte da produção nacional de cana-de-açúcar e de etanol, parte relevante dos cultivos originais (alguns tipos de grãos, leguminosas e frutas) foram deslocados para produção da cana-de-açúcar, e, de modo correlato, para

produção de etanol (Piacente et al., 2022). Nesse contexto, certa perda da qualidade nutricional às populações locais mais socioeconomicamente vulnerabilizadas pode ter ocorrido neste processo, na medida em que determinados alimentos podem ter se tornado mais caros diante da necessidade de transporte a partir de locais de produção eventualmente mais distantes dos locais de consumo. Segundo Bermann (2008), seria impossível para o Brasil optar por substituir todo o seu combustível fóssil por biomassa, dada as escalas de terras agrícolas demandadas, sem contar os defensivos agrícolas que são à base de combustíveis fósseis e, majoritariamente, importados.

No que se refere a outras interdependências do nexus ora em análise, cabe ainda mencionar: (1) Água → Alimento → Energia. A irrigação é vital em determinadas regiões do Brasil. Nesse contexto, eventual falta de água (associada a menos chuvas) reduz a produtividade agrícola e os níveis dos reservatórios das UHE, implicando em redução da produção de eletricidade por tais usinas; (2) Água → Energia. As UHE e o resfriamento das usinas termoelétricas dependem diretamente de disponibilidade hídrica. Assim, uma menor disponibilidade hídrica, aspecto associável ao avanço das mudanças climáticas (e, de modo correlato, ao aumento do aquecimento global), implica em dificuldades na operação destas usinas; (3) Energia → Alimento. A mecanização, o transporte e a produção de insumos agrícolas dependem, fundamentalmente, de energia. Nesse contexto, uma menor produção de energia (particularmente, energia elétrica), invariavelmente, há de impactar a produção de alimentos no país; (1) Energia → Água. O bombeamento e o tratamento de água e esgoto requerem eletricidade. Uma redução na produção de energia elétrica, nesse contexto, tende a implicar em problemas para o fornecimento de água potável à população e, também, quanto à manutenção e ampliação de serviços de saneamento básico.

## Energia e meio ambiente no Brasil no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no que se refere à energia estão circunscritos ao ODS 7, que objetiva “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos” (UN, 2025). O ODS 7, por sua vez, é composto pelos seguintes itens: 7.1) Até 2030, assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia; 7.2) Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global; 7.3) Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética; 7.a) Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia alternativa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e menos poluentes, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa e; 7.b) Até 2030, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento, particularmente nos países menos desenvolvidos, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos programas de apoio (UN, 2025).

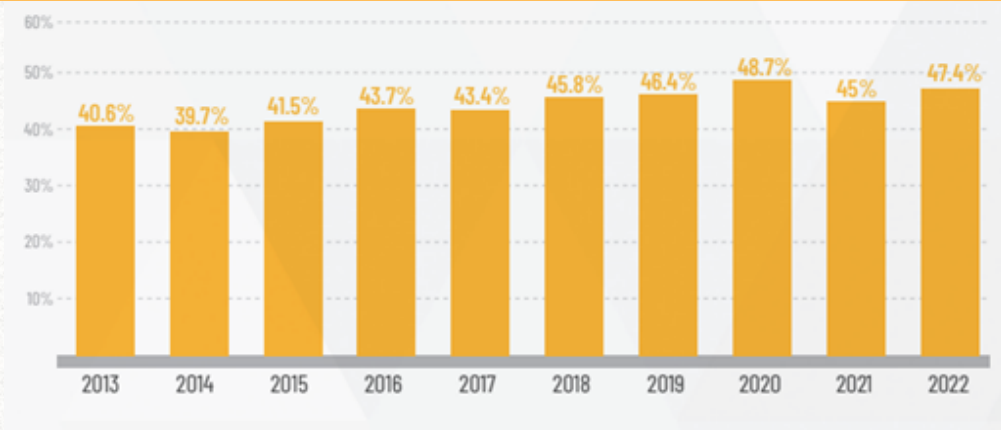
O CSWG - Civil Society Working Group -, anualmente, aponta para o avanço dos ODS, como parte da agenda 2030 para as mudanças climáticas. O relatório do CSWG de 2024 aponta que, no Brasil, nenhum dos objetivos estão sendo cumpridos de maneira satisfatória (CSWG, 2024). Os objetivos 7.1 e 7.2 estão esgotados,

enquanto os objetivos 7.3 e 7.b estão insuficientes, e o 7.a encontra-se em zona de risco (CSWG, 2024).

O Objetivo 7.1 está estagnado, com a universalização do acesso à eletricidade em 99,8% da população, o que representa algo em torno de meio milhão de pessoas permanecem sem acesso a serviços de energia elétrica, principalmente na

Amazônia. Carecem de acesso à energia elétrica, principalmente, as populações rurais marginalizadas, particularmente aquelas composta por indígenas, quilombolas e mulheres negras<sup>9</sup> (CSWG, 2024). A evolução do Objetivo 7.2. em nível nacional, por sua vez, pode ser observada pela Figura 8.8.

**Figura 8.8 - Evolução da participação das fontes renováveis no total da oferta energética brasileira entre 2013 e 2022**



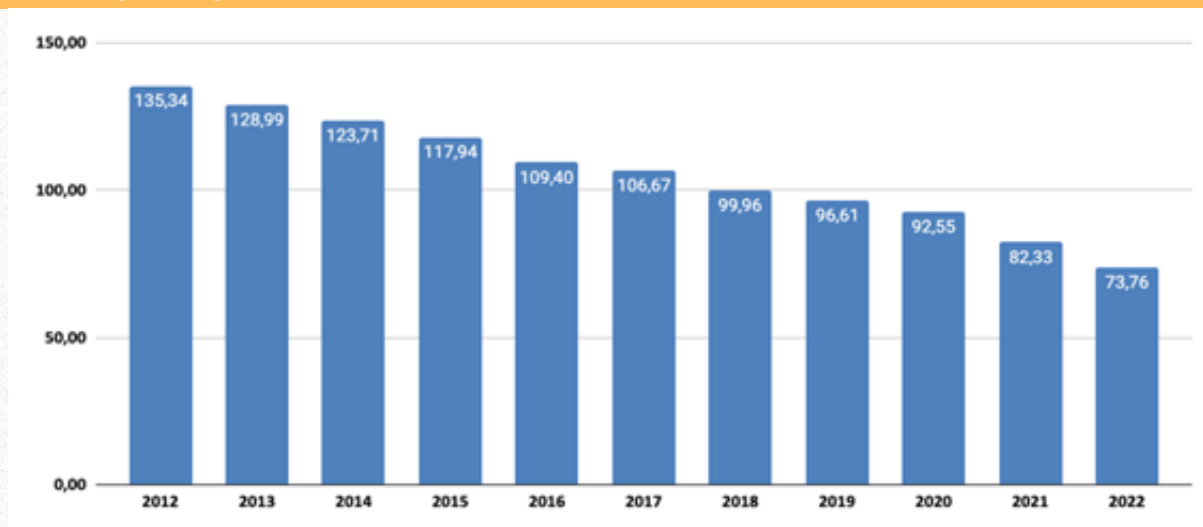
Fonte: CSWG (2024).

A intensidade energética, item cotejado pela ODS 7.3, pode ser compreendida como a quantidade de energia gasta para gerar cada unidade de PIB per capita. Como se observa na Figura 8.9, o Brasil vem apresentando ganhos de eficiência ao longo do tempo,

diminuindo a quantidade de energia em MWh necessária para produzir em sua economia, mas ainda parece longe de conseguir reduzir pela metade até 2030, o que significaria cumprir com o ODS 7.3<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> No Brasil é o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o IBGE, que, no âmbito da Agenda 2030, a instituição pública que coordena a produção de indicadores para monitorar os 17 ODS no Brasil, além de adaptar as metas globais à realidade brasileira, considerando as desigualdades socioeconômicas regionais. O IBGE também se vincula aos 17 ODS por meio de dados disponibilizados na Plataforma ODS Brasil (uma base interativa com os indicadores nacionais) e através da produção de pesquisas (tal como a PNAD Contínua, a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua), censos e estatísticas socioeconômicas. Frisa-se que as análises apresentadas no presente Capítulo 7 a respeito da condição atual da ODS 7 no Brasil consideraram dados da PNAD mais recente do IBGE (2024).

**Figura 8.9 – Evolução da Intensidade elétrica no Brasil, em MWh para cada real de PIB per capita, entre 2012 e 2022**



Fonte: Adaptado de EPE (2025).

## Transformação verde no contexto do setor energético brasileiro

### A Intermitência das fontes renováveis modernas

A intermitência das renováveis é um dilema enfrentado, não apenas pelo Brasil, mas por boa parte dos países e regiões que procuram substituir suas fontes fósseis por fontes renováveis modernas. No contexto brasileiro, a intermitência das fontes renováveis modernas, como eólica e solar, se torna um desafio relevante, especialmente diante da rápida expansão dessas fontes na última década.

O Brasil possui um sistema elétrico predominantemente hidrotérmico, com forte presença de usinas hidrelétricas de reservatório; tais usinas historicamente funcionaram como um grande "banco de energia" natural, compensando variações na geração. No entanto, com o envelhecimento dos parques hidrelétricos, restrições

ambientais à construção de novos reservatórios e diante do aumento expressivo da geração eólica (especialmente no Nordeste) e solar (no Sudeste e Centro-Oeste), o sistema começa a enfrentar situações de excesso momentâneo de geração (*curtailment*<sup>10</sup>), correlatamente à necessidade de maior acionamento das usinas termelétricas – as quais são tipicamente caras e emissoras de GEE –, para manter o equilíbrio.

A malha de transmissão nem sempre consegue escoar toda a energia gerada em regiões com alto potencial renovável,

agravando o problema. Além disso, a operação do sistema precisa lidar com a estocasticidade das afluições (variabilidade natural das chuvas que abastecem os reservatórios), que, somado à variabilidade da solar e da eólica, torna o dilema do operador ainda mais complexo. Isso exige investimentos crescentes em flexibilidade, como térmicas de resposta rápida, expansão das interligações, desenvolvimento de mercados de serviços ancilares<sup>11</sup> e, futuramente, maior participação de armazenamento em baterias.

Além dos desafios técnicos associados à intermitência das fontes renováveis modernas, o Brasil vive um momento de transformação

<sup>10</sup> O termo *Curtailment* refere-se à redução ou corte da geração de energia elétrica, em geral a partir de fontes renováveis modernas, como solar e eólica, que ocorre quando a rede elétrica não tem capacidade de absorver a eletricidade produzida. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável por determinar esses cortes. O *Curtailment* é necessário para manter o equilíbrio e a segurança do sistema, sendo causado por excesso de produção em relação à demanda, por razões de confiabilidade, limitações da rede de transmissão ou por indisponibilidade de infraestrutura.

<sup>11</sup> Serviços ancilares referem-se a funções e atividades complementares ao serviço principal de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, que visam garantir a estabilidade, segurança e eficiência do sistema elétrico. Exemplos incluem aspectos essenciais para o funcionamento contínuo do sistema, tais como: controle de frequência, fornecimento de potência reativa para o controle de tensão e a capacidade de autorrestabelecimento de usinas após falhas.

estrutural no setor elétrico, marcado pela privatização da Eletrobras e pela ampliação acelerada do mercado livre de energia. A Eletrobras, enquanto empresa pública, historicamente operava com uma lógica de segurança energética e modicidade tarifária, podendo despachar seus ativos – sobretudo grandes hidrelétricas – com foco no equilíbrio sistêmico, inclusive atuando como uma espécie de "amortecedor" dos custos do sistema.

Com a privatização, seu papel muda: a empresa agora responde primariamente aos interesses dos acionistas, priorizando rentabilidade, o que reduz sua disposição em operar abaixo do custo marginal ou realizar operações benéficas ao sistema, mas não remuneradas diretamente. Paralelamente, a liberalização do mercado fragmenta o setor: os consumidores migram do mercado regulado para o mercado livre, no qual contratam energia diretamente dos geradores, deixando as distribuidoras com sobrecontratação, aumento dos encargos e perda de previsibilidade.

Tal contexto fragiliza o modelo de financiamento de expansão da infraestrutura, que, historicamente, dependia da segurança dos contratos regulados, além de dificultar a compatibilização entre o despacho físico centralizado (coordenado pelo ONS) e os contratos financeiros descentralizados. Na prática, isso intensifica os desafios operacionais, tarifários e de planejamento, potencializando a chamada "espiral da morte" – um ciclo não virtuoso no qual os consumidores que podem deixam o mercado regulado, elevando os custos para quem permanece, pressionando tarifas e gerando mais migração.

Cabe mencionar que as energias solar e eólica, significam, per se, formas de geração de eletricidade bastante adequadas ao país, respectivamente, diante dos abundantes aportes de intensos raios solares e de velocidades dos ventos adequadas típicas no Brasil (velocidades médias anuais entre 6,5 e 9 m/s são consideradas adequadas para se otimizar o desempenho de um parque eólico). A intermitência associada a tais fontes energéticas – ou seja, a variação na geração a depender do Sol e dos ventos –, porém, ainda que o Sistema Interligado Nacional (SIN) seja bem integrado e com mais de 60% da geração advinda das usinas

hidrelétricas, deve ser ao máximo mitigada para que haja maior grau de segurança energética no país.

A redução de problemas associáveis à intermitência associáveis à geração solar e eólica, deve ainda considerar as seguintes estratégias e ações: (1) Armazenamento energético a partir de baterias de lítio para equilíbrio de curto prazo (Exemplo: baterias conectadas a parques solares na Região Nordeste) e seu respectivo descarte e condicionamento ou reciclagem; (2) Usinas reversíveis (bombeamento hidráulico) usam a energia excedente para bombear água para reservatórios, liberando-a posteriormente; (3) Armazenamento químico, que se relaciona à produção de Hidrogênio Verde (H2V) a partir do excedente solar/eólico, que, subsequentemente, pode ser utilizado em usinas térmicas ou no setor de transporte. Frisa-se que no Brasil o armazenamento híbrido (hidrelétricas + baterias + H2V) tende a ser menos custoso e mais eficiente do que tão somente a partir de baterias; (4) Diversificar com maior complementariedade geográfica, afinal as usinas solares geram mais nas regiões Centro-Oeste e Nordeste (principalmente), enquanto as usinas eólicas têm picos produtivos noturnos e é mais forte no litoral nordestino e no Sul. Além disso, a sazonalidade é complementar; assim, os ventos costumam soprar mais na época seca, quando há menos água nos reservatórios. Nesse mesmo contexto, ainda que já esteja havendo investimentos governamentais em "linhões do Nordeste" para integrar solar e eólica ao SIN, urge conectar melhor as regiões por meio de linhas de transmissão de longa distância (HVDC); (5) Complementar com usinas térmicas flexíveis e com biocombustíveis, afinal usinas térmicas a gás natural, biomassa ou gás natural, que são ambientalmente muito melhores do que as usinas térmicas fósseis (menor pegada de carbono e, portanto, menor emissão de CO<sup>2</sup>), podem atuar tão somente em horários de baixa geração renovável; (6) Gestão da demanda através, por exemplo, de tarifas diferenciadas que fomentem o consumo de eletricidade nos horários de maior geração a partir das usinas solares e eólicas, de estratégias aplicadas aos setores industrial e comercial visando o deslocamento de cargas flexíveis (bombeamento e refrigeração, por exemplo) para horários com geração

solar/eólica; (7) Previsibilidade e digitalização priorizadas, particularmente por meio de redes inteligentes (smart grids, que permitem controle mais dinâmico e conexão de microgeração distribuída) e pelo aprimoramento de modelos de previsão meteorológica e sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) para antecipar a previsibilidade de variações.

## Panorama H2

O Brasil tem potencial para tornar-se um relevante produtor de hidrogênio de baixo carbono, dadas suas condições naturais favoráveis e matriz elétrica predominantemente renovável, associada a custos de produção relativamente baixos, especialmente para as fontes hidrelétrica, eólica e solar (Garlet et al., 2024).

Grandes investimentos vêm sendo anunciados nos projetos de geração, especialmente no litoral das regiões Nordeste e Sul do país. Estes projetos localizam-se, majoritariamente, em complexos portuários e industriais (de Oliveira, 2022). Globalmente, há também esforços voltados à pesquisa de fontes naturais de hidrogênio e rotas alternativas de produção — como processos microbianos, eletroquímicos e fotoquímicos, a partir de resíduos orgânicos, biogás, materiais celulósicos e água. A previsão é que esse mercado, globalmente, movimente entre 10 e 12 bilhões de dólares até 2040 (McKinsey, 2021), consolidando-se como uma das grandes apostas da transição energética (Collaço et al., 2024).

A principal rota atualmente utilizada é a reforma a vapor do metano (hidrogênio cinza), responsável por cerca de 95% da produção mundial. Essa técnica é valorizada por sua alta eficiência (entre 70% e 85%) e pela ampla aplicação industrial do hidrogênio, especialmente nas refinarias, na produção de amônia e fertilizantes e em setores como siderurgia e metalurgia (CNI, 2024; GIZ, 2021). No entanto, é uma rota intensiva em emissões: para cada tonelada de hidrogênio produzido, aproximadamente 10 toneladas de CO<sub>2</sub> são lançadas na atmosfera (GIZ, 2021).

É nesse contexto que o hidrogênio verde ganha protagonismo. Sua produção ocorre pela quebra da molécula de água (H<sub>2</sub>O), via eletrólise alimentada por energia renovável, sem emissão direta de CO<sub>2</sub>. Ainda que o

conceito de “emissão zero” seja, na prática, inatingível quando se considera todo o ciclo de vida (produção, transporte e armazenamento), o H2V representa um avanço significativo frente às alternativas fósseis. Por isso, cresce o uso do termo “hidrogênio de baixo carbono” para designar produções com menor pegada de carbono que o hidrogênio cinza (Morante et al., 2020; Barisano, 2021).

De acordo com a EPE (2025), o custo médio atual de produção de hidrogênio por meio do Reformador a Vapor de Metano (SMR, Steam Methane Reforming) com Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, Carbon Capture and Storage) é de cerca de US\$ 2,98/kg H<sub>2</sub>, sendo que o CCS responde por aproximadamente 70% desse valor. Sem CCS, o custo do hidrogênio via SMR cai para aproximadamente US\$ 1,19/kg H<sub>2</sub>. Já a produção por Gaseificação do Carvão (CG, Coal Gasification) com CCS está em torno de US\$ 3,35/kg H<sub>2</sub>, enquanto, sem CCS, o valor é de cerca de US\$ 1,93/kg H<sub>2</sub>.

Já com relação a pirólise do metano (CH<sub>4</sub>) ou bio-CH<sub>4</sub> é uma tecnologia em desenvolvimento (TRL 3–8) que produz hidrogênio sem emissões diretas de CO<sub>2</sub>, já que o carbono é liberado em forma sólida. Como exige o uso de energia limpa, dispensa sistemas de captura e armazenamento de carbono. Apesar da dependência dos preços do gás natural/biometano e da baixa disponibilidade tecnológica, os custos estimados variam entre US\$ 2,2–3,4/kg H<sub>2</sub> no cenário internacional e US\$ 1,5–4,4/kg H<sub>2</sub> no Brasil.

A decomposição termoquímica da biomassa (pirólise e gaseificação) apresenta TRL 5–6 e pode ser considerada comercialmente disponível em média escala. Os custos estimados vão de US\$ 1,2–3,1/kg H<sub>2</sub> (pirólise) e US\$ 0,9–5,2/kg H<sub>2</sub> (gaseificação), dependendo de fatores como tipo de biomassa, tecnologia empregada e aproveitamento dos subprodutos.

A eletrólise da água é a rota mais consolidada (TRL 6–9) e com maior potencial de expansão, mas ainda enfrenta desafios de eficiência e custo. Em 2022, os valores ficaram entre US\$ 3,7–12/kg H<sub>2</sub>.

As tecnologias fotolíticas (PEC e fotocatalise) permanecem em estágios iniciais (TRL 3–5), com limitações de eficiência e estabilidade, e

custos ainda acima de US\$ 10/kg H<sub>2</sub>. Já a divisão termoquímica da água mostra-se promissora, com eficiência de cerca de 57% e custos entre US\$ 2,2–8,4/kg H<sub>2</sub>, mas sua maturidade tecnológica ainda não ultrapassa a validação laboratorial (TRL 4).

As tecnologias de Células de Eletrolise Microbiana (MEC, Microbial Electrolysis Cells) encontra-se em TRL 4, devido a limitações técnicas como: queda no rendimento de H<sub>2</sub> por sumidouros de elétrons indesejados, complexidade na configuração real dos reatores em relação à teórica, necessidade de compreender as interações microbianas para evitar competição e dificuldades em atender padrões de efluentes no uso como tratamento de resíduos. Ainda assim, os custos estimados variam entre US\$ 1,2–6,6/kg H<sub>2</sub>.

Já o hidrogênio geológico é classificado pela IEA em TRL 5. Avanços em sensores para prospecção (TRL 7–8) e a possibilidade de aproveitar dados e tecnologias da indústria de petróleo e gás reforçam seu potencial. Contudo, ainda há desafios, como entender sua formação, viabilidade econômica das reservas e formas seguras de extração. O uso *in situ* poderia contribuir para reduzir impactos ambientais, mitigando indiretamente alterações climáticas e danos à camada de ozônio.

O H<sub>2</sub> oferece uma ampla gama de aplicações. Entre elas, destaca-se a produção de aço verde na siderurgia, substituindo o uso do carvão mineral; a fabricação de amônia verde e fertilizantes de baixa emissão; e o metanol verde, essencial para produtos industriais, como tintas, combustíveis, solventes e eletrônicos. Além disso, o H<sub>2</sub>V pode ser empregado em processos de hidrorrefino para remover heteroátomos, como o enxofre, de produtos petroquímicos (Garlet et al., 2024). Mas, a maior transformação trazida pelo H<sub>2</sub>V está em seu potencial como portador de energia e combustível promissor para o futuro no setor de transportes. Sendo um vetor energético, isto é, uma substância que gera trabalho mecânico ou calor e desencadeia reações químicas ou físicas, o H<sub>2</sub>V pode ser utilizado em veículos movidos por células de combustível.

Embora a eletrificação direta com baterias esteja ganhando popularidade no setor automotivo, essa tecnologia ainda não é viável para modais de grande porte, como caminhões, aviões e navios. Isso ocorre porque a capacidade de armazenamento de energia em baterias é insuficiente para percorrer grandes distâncias sem recarga, além do longo tempo necessário para esse processo. Por outro lado, veículos de transporte de massa têm grande potencial para o uso de hidrogênio, já que as células de combustível são mais eficientes, permitem deslocamentos mais longos com menos necessidade de reabastecimento, e produzem apenas água como subproduto (Gomes, 2023).

Em 2023, a produção global de hidrogênio alcançou cerca de 97 milhões de toneladas, e as emissões correlatas foram significativamente menores do que 900 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, embora a maior parte ainda advinha de fontes fósseis. Destarte, a produção de hidrogênio de baixo carbono (verde ou azul) foi inferior a 1 Mt em 2023, enquanto o hidrogênio "cinza" (gerado a partir de combustíveis fósseis e sem captura de carbono) é o principal responsável pelas emissões. Apesar disso, o hidrogênio de baixo carbono respondeu por apenas 0,7% da demanda total, avançando de forma bastante lenta nas aplicações já existentes. Até dezembro de 2023, a capacidade instalada de eletrolise somava apenas 1.100 MW. Para que o hidrogênio verde avance e substitua o hidrogênio cinza, será necessário ampliar a capacidade de produção de eletrolisadores. Além disso, outros elos da cadeia precisarão se estruturar, como a geração de energia, dessalinização da água, transporte e armazenamento. Em termos de competitividade, o hidrogênio verde ainda apresenta custos superiores às alternativas em diversas aplicações (CELA, 2024).

Em 2024, com a promulgação do Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono (Lei nº 14.948), o Governo do Brasil instituiu incentivos econômicos ao setor, como a concessão de subsídios a empresas — em sua maioria multinacionais dos ramos energético, petrolífero e de fertilizantes. Embora o desenvolvimento da cadeia de H<sub>2</sub>V

represente uma oportunidade para descarbonizar setores industriais de difícil abatimento, gerar empregos e distribuir renda, há um risco significativo de que os benefícios ao país sejam limitados, diante da atual orientação voltada à exportação do insumo no formato de NH<sub>3</sub> verde. Soma-se a isso o fato de que essa indústria é intensiva em água e energia, podendo pressionar a matriz energética nacional, impactar negativamente os recursos naturais, afetar comunidades no entorno de tais indústrias e levantar questionamentos sobre os ganhos reais para a sociedade brasileira em relação à sua economia produtiva local.

Nesse contexto, a amônia de baixo carbono ganha destaque: por seu papel central na produção de fertilizantes, trata-se de um insumo estratégico para a segurança alimentar. Estudos projetam que, após 2035, o Custo Nivelado da Amônia (LCoA, Levelized Cost of Ammonia), estimado para o Brasil entre US\$ 5,1–69,1/GJ, poderá ser mais competitivo do que tanto a amônia fóssil (US\$ 12,5–62,2/GJ) quanto a amônia de baixo carbono global (US\$ 14–72/GJ) (EPE, 2025 b ). Contudo, esse potencial não garante, por si só, benefícios estruturais para o Brasil: se for direcionado apenas à exportação, corre-se o risco de repetir um modelo de especialização produtiva que transfere valor para fora e gera pouco retorno social.

Assim, cabe ao Brasil decidir como irá participar desse mercado: como mero exportador de insumo energético ou como articulador de uma política industrial verde, capaz de transformar competitividade em inovação, inclusão e desenvolvimento econômico e social.

## Principais respostas em prol da redução das emissões de GEE relacionadas à energia nos setores mais demandantes por tal insumo

### O setor energético brasileiro e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas

As emissões de GEE inerentes ao setor energético brasileiro, em geral, são mais difíceis de serem abatidas do que aquelas associadas aos setores de mudanças no uso da terra (incluindo o desmatamento) e de agropecuária, os quais, historicamente, respondem pela maior parte das emissões brasileiras de tais gases. E isto na medida em que o Brasil é um país tipicamente exportador de commodities de baixo valor agregado (relativamente a países que se caracterizam mais pela exportação de bens manufaturados). Isso acontece por algumas razões: a) O setor de energia recebe poucos subsídios para a descarbonização; b) Lobbies de indústrias fósseis são consolidados em recursos e expertise ; c) O fato de o Brasil ser um país destaque no mundo por sua oferta primária de energia ser caracteristicamente renovável (cerca de 50%), pode transmitir a falsa impressão de que a descarbonização está acontecendo, quando, na verdade, a maioria dos demais países é que estão negligenciando suas metas; d) *Royalties* do Pré-Sal encerram o potencial de viabilizar políticas públicas municipais socialmente relevantes (por exemplo nas áreas de educação, saúde, iluminação, saneamento, transporte, dentre outras).

Nesse contexto, no caso do Brasil, políticas públicas e privadas devem focar atenções no fomento ao desenvolvimento científico e tecnológico capaz de oportunizar aos atores diversos envolvidos com o setor energético do

país ainda mais eficazes estratégias e ações indutoras de redução nas emissões de GEE relacionadas a este setor.

Cabe ressaltar que devido às dimensões continentais do Brasil, às especificidades socioculturais e em vista da diversidade de biomas e de ecossistemas caracterizadores do território do país, observa-se amplo espectro de perfis de emissões de GEE dentre as 5 regiões e mesmo dentre as 27 unidades federativas (os 27 estados e mais o Distrito Federal do Brasil); o que, *per se*, aumenta a complexidade de se desenhar uma estratégia multinível de abatimento das emissões pelo setor energético brasileiro. Portanto, políticas climáticas voltadas à redução das emissões de GEE no Brasil devem se voltar, prioritariamente, ao delineamento de estratégias e ações mais tipicamente regionalizadas e, assim, em níveis subnacionais.

#### **A questão dos subsídios aos combustíveis fósseis e o papel de mudanças nos padrões de consumo**

Mais amplamente, pode-se afirmar que as estratégias e ações que viabilizem importantes redução das emissões de GEE pelo setor energético do Brasil (ou seja, que induzam à descarbonização deste setor), inexoravelmente, devem cotejar mudanças nos padrões de consumo, o que há de requerer duradouras políticas nacionais e subnacionais (particularmente no que tange à Educação Ambiental e em todos os níveis de ensino público e privado), políticas mais ambiciosas e robustas voltadas à eficiência energética, iniciativas de ampla mitigação dos subsídios à indústria dos combustíveis fósseis atuante no país. Tais subsídios, concedidos principalmente pelo Governo Federal (e, também, por alguns governos estaduais do Brasil), atingiram, em 2023, cerca de R\$ 81,74 bilhões (cerca de US\$ 14,42 bilhões, considerando a cotação do dólar em 29/05/2025), e incluíram renúncias tributárias, gastos diretos e isenções fiscais, abarcando tanto a produção quanto o consumo de petróleo e seus derivados (particularmente, os derivados líquidos, como a gasolina, o óleo diesel e o querosene de aviação), gás natural e carvão mineral.

Frisa-se que tal valor representou, em 2023, cerca de vinte e três vezes mais do que os recursos destinados pelo Governo Federal ao Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) e a suas autarquias (INESC, 2024). Este contexto, *per se*, denota a complexidade e os obstáculos<sup>12</sup> correlatos à aceleração da transição energética no Brasil e, conseqüentemente, exprime os desafios associáveis à redução das emissões de GEE pelo setor energético do país.

Neste contexto, frisa-se que no Brasil, em 2023, por meio de subsídios, para cada R\$ 1,00 investidos em energias renováveis, R\$ 4,52 foram investidos na produção e no consumo de combustíveis fósseis; ou seja, em 2023, cerca de 80% de tais subsídios foram destinados às fontes fósseis, e 20% às energias renováveis (INESC, 2024), o que desmistifica a crítica (por parte de alguns atores do setor elétrico nacional, de indústrias de alta intensidade energética e pelo setor de combustíveis fósseis) de que as fontes renováveis no Brasil têm sido exageradamente subsidiadas.

Cabe ressaltar, ainda, que a infraestrutura para a realização da transição energética no Brasil tem sido majoritariamente financiada por bancos públicos de fomento e empresas públicas, particularmente o BNDES ( Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), o BNB (Banco do Nordeste do Brasil S. A.), a FINEP ( Financiadora de Estudos e Projetos), o Sicredi (Sistema de Créditos Corporativos) e o BRDE ( Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul). Entre 2014 e 2024, bancos públicos e empresas públicas aportaram R\$ 146 bilhões em projetos de transição energética já em operação ou em desenvolvimento no território brasileiro (ABDE, 2025). A aceleração da transição energética no Brasil, portanto, depende que este tipo de fomento aumente ainda mais e que, paralelamente, ocorra efetivo envolvimento setor privado por meio de financiamento direto.

#### **Desafios associáveis às usinas hidrelétricas**

Por sua feita, é muito importante que sejam enfrentados os múltiplos desafios associáveis à construção de novas usinas hidrelétricas

<sup>12</sup> Por exemplo, políticos, especialmente no que se refere ao enfrentamento do poder lobista exercido pela indústria dos combustíveis fósseis junto ao Governo Federal.

(particularmente aquelas com capacidade instalada acima de 30 MW, ou seja, as UHE), que, historicamente, ainda que nos últimos anos tenha sido empregada a relativamente menos impactante tecnologia a fio d'água (que requer pouco ou mesmo nenhum armazenamento de água), respondem no Brasil por toda uma gama de impactos socioambientais às populações locais (ribeirinhos, indígenas e quilombolas, por exemplo), tais como: desmatamento, perda de biodiversidade, alagamento de grandes áreas, redução da atividade pesqueira, perda de navegabilidade dos rios afetados, dentre outros. Frisa-se, ainda, que a decomposição da matéria orgânica nos reservatórios, em quantidades diversas (a depender do tamanho da usina hidrelétrica), libera para a atmosfera o metano (CH<sub>4</sub>), um GEE muito mais potente do que o CO<sub>2</sub> no sentido de aumentar o aquecimento global; portanto, reduzir as emissões de GEE pelo setor energético do país também perpassa as emissões de CH<sub>4</sub> decorrentes da construção de UHEs.

### **Desafios correlatos às energias renováveis não hídricas e outras oportunidades de mitigação das emissões de GEE**

Estratégias outras, estas mais dependentes de avanços tecnológicos, incluem a ampliação da produção de eletricidade a partir de usinas solares fotovoltaicas (centralizada e distribuída) e de usinas eólicas *onshore* e *offshore* - neste caso, e até diante do estágio ainda caracteristicamente inicial, o arcabouço regulatório deve ser aprimorado, contemplando, de forma equânime, os interesses de todos os atores envolvidos, particularmente a população local e os setores público e privado. Concomitantemente, o país deve reduzir sua dependência por tecnologias carbono-intensivas, particularmente em nível de

infraestruturas de vida útil mais longa, tais como aquelas correlatas a termelétricas a combustíveis fósseis (carvão mineral, óleo diesel e gás natural) e refinarias de petróleo, e, gradativamente, redirecionar os investimentos de E&P no setor petrolífero para fontes energéticas renováveis.

Oportunidades relevantes para redução das emissões de GEE pelo setor de energia do Brasil devem, também, cotejar: (1) Modernização, via redes inteligentes (*smart grids*), da infraestrutura de transmissão e distribuição de energia visando integrar fontes renováveis (e, assim, mitigando problemas decorrentes de suas intrínsecas intermitências) e minimizar perdas; (2) Aumento da produção de biocombustíveis (notadamente, etanol de primeira geração, etanol de segunda geração<sup>13</sup> (principalmente em relação ao etanol de primeira geração, por ser menos ambientalmente impactante em seu processo produtivo), biodiesel, diesel verde e HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*, o qual é produzido por meio de aprimoramentos tecnológicos ao diesel verde, e cuja produção e consumo mundial tem se expandido sobremaneira) e de combustíveis sintéticos; (3) Fomento às estratégias Waste-to-Energy (WtE) e *Biomass-to-Energy*<sup>14</sup>; (4) Ampliação de uso da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (contemplando avanços científicos e tecnológicos que cotejem requisitos ambientais); (5) Ampliação da produção de Hidrogênio Verde (H<sub>2</sub>V) (observando o mercado internacional e as possibilidades de emprego do H<sub>2</sub>V na melhoria da qualidade ambiental do parque industrial brasileiro e em prol da descarbonização dos modais de transporte); e (6) Produção de combustíveis sustentáveis de aviação (*Sustainable Aviation Fuel – SAF*). Cabe ressaltar que diversos estudos, realizados no Brasil e fora do país, apontam que combinar incentivos à migração modal com estratégias de eletrificação tem amplo

<sup>13</sup> O etanol celulósico, ou etanol de segunda geração (E2G), refere-se a um biocombustível cuja produção se baseia em resíduos da cana-de-açúcar, como o bagaço e a palha, ao invés do caldo da cana, que é a matéria-prima central para produção do etanol de primeira geração. No processo de fabricação do E2G se utiliza biomassa lignocelulósica (lignina, hemicelulose, celulose). Assim, o E2G é menos carbono-intensivo por aproveitar o que antes seria descartado, aumentando, deste modo, a produtividade sem necessidade de ampliação da área para plantio e, concomitantemente, reduzindo a pegada de carbono.

<sup>14</sup> WtE refere-se à conversão de resíduos sólidos urbanos (RSU), industriais ou agrícolas em energia (biocombustíveis, eletricidade, calor). Os processos mais usuais de WtE são gaseificação, digestão anaeróbica, incineração controlada e pirólise. Para além da geração energética, o Waste-to-Energy, que responde por amplo potencial no Brasil (particularmente por meio de resíduos agrícolas, em especial aqueles originados pela produção de cana-de-açúcar), reduz o volume de resíduos destinados a aterros, e, assim, mitiga as emissões de metano (CH<sub>4</sub>). Por sua vez, Biomass-to-Energy, já amplamente utilizada no país para produção de bioeletricidade (a partir de palha e do bagaço de cana-de-açúcar), significa a produção de energia com base em materiais orgânicos renováveis, tais como dejetos de animais, óleo de dendê, resíduos agrícolas e florestais, lenha, dentre outros; tal estratégia, capaz de gerar calor, biocombustíveis líquidos (biodiesel e etanol) e eletricidade, pode ser considerada relevante em prol da diversificação da oferta energética do Brasil e com o benefício de atenuar o problema dos RSU.

potencial de mitigar as emissões de GEE relativas ao setor de transporte (IPCC, 2022).

A respeito dos biocombustíveis, destaca-se o Programa RenovaBio, criado em 2017 e que institui a Política Nacional de Biocombustíveis. O RenovaBio significa uma política de Estado em prol da ampliação da eficiência energética e da redução das emissões de GEE pelo setor de transporte. Tal programa, desde que superados os desafios regulatórios ainda existentes, pode vir a significar importante estratégia para redução das emissões de GEE pelo setor de transporte do Brasil. Destarte, o RenovaBio deve ser amplamente fortalecido, e, para tanto, um maior envolvimento do setor privado é desejável.

### **Energia nuclear**

Há, ainda, de se considerar o papel da energia nuclear (fissão nuclear) na mitigação das emissões de GEE pelo uso da energia no Brasil. A despeito de não poder ser considerada como uma fonte energética renovável<sup>15</sup>, a energia nuclear induz à mitigação climática já que durante a geração de eletricidade, praticamente não há emissão de CO<sub>2</sub>. Nesse contexto, frisa-se que as emissões deste GEE ocorrem na etapa de mineração do urânio, construção das usinas nucleares e transporte. Deve considerar que, de fato, as usinas nucleares, emitem muito menos CO<sub>2</sub> do que as usinas termelétricas fósseis, além de representarem uma fonte energética previsível e estável (desde que acidentes não ocorram, por óbvio). Conforme analisado, a oferta de energia elétrica do Brasil é majoritariamente renovável, portanto, o impacto das usinas Angra 1 e Angra 2 na mitigação de GEE é menor do que naqueles países dependentes do carvão mineral para geração de eletricidade.

No Brasil, a energia nuclear responde por papel importante, em especial no que se refere à segurança energética em períodos de seca; ou seja, quando os reservatórios hidrelétricos estão baixos. Nesse contexto, as usinas Angra 1 e Angra 2 oportunizam menos acionamentos das usinas termelétricas fósseis; e, portanto, se relacionam a menores emissões de GEE pelo setor energético do país.

### **Conexões entre políticas energéticas e políticas climática**

Urge destacar ainda que reduções mais expressivas das emissões de GEE pelo setor energético do Brasil se relacionam, intrinsecamente, com mais conexões e inter-relações entre as políticas (e as prioridades) energéticas e climáticas. Outrossim, todas as estratégias e ações aqui elencadas em prol da mitigação das emissões de GEE (e, assim, voltadas à mitigação das mudanças climáticas e do aquecimento global), direta ou indiretamente, requerem que ocorra no país toda uma mudança paradigmática em termos de muito mais valorização da ciência no seio da população brasileira, afinal a detenção (interna) de *know-how* é *mister* neste processo, inclusive no sentido de combate exitoso ao tão deletério negacionismo científico (e climático), o que tende a viabilizar o desenvolvimento e a implementação de mais eficazes políticas climáticas nacionais e subnacionais; nesse sentido, é fundamental que mais investimentos públicos e privados sejam aportados à produção científica pelo Brasil e, em todos os níveis, à Educação no país. Outro desafio, talvez ainda mais agudo, seja a transposição do conhecimento científico em políticas públicas, incentivos e regulações que sejam efetivas na mitigação de impactos climáticos e conflitos socioambientais.

### **O uso de energia pelo setor de transporte e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas**

Especificamente no caso do setor de transporte, o principal contribuinte setorial para as emissões de GEE relacionáveis à energia no país (tal setor foi responsável, em 2022, por 33% de tais emissões) (SEEG, 2024), é premente que sejam priorizadas ações voltadas à melhoria da economia de combustível, e que políticas (de âmbito federal, principalmente) foquem na mudança para modais de baixo carbono (prioritariamente, os ônibus e os trens elétricos, a navegação de cabotagem e o transporte por meio de veículos de propulsão humana, em especial a bicicleta), assim como ampliar as sinergias entre a geração energética e os meios de transporte. No caso dos ônibus elétricos, deve haver ampliação do

<sup>15</sup> Afinal o urânio, matéria-prima essencial para a operação das usinas nucleares de Angra 1 e Angra 2, é recurso natural finito na crosta terrestre; portanto, o urânio é um recurso natural não renovável.

financiamento para infraestruturas de recarga e redução de impostos. Além disso, um arcabouço regulatório mais consistente e incentivos econômicos tendem a ampliar o uso no país de tecnologias avançadas de motores flex-fuel e híbridos.

Ressalta-se, ainda, que o objetivo de redução das emissões de GEE devido ao consumo de energia pelo setor de transporte também deve priorizar o fortalecimento do PROBIODIESEL, o Programa Nacional de Biodiesel (o qual foi lançado, pelo Governo Federal, em 2002), e dos recentemente lançados Programa Nacional de Hidrogênio (o PNH<sub>2</sub>, instituído, em 2022, pelo Governo Federal e que objetiva fortalecer o mercado e a indústria do H<sub>2</sub> enquanto vetor energético no Brasil) e a “Lei do Combustível do Futuro”, que entrou em vigor por força da Lei 14.993/2024, e que visa o aumento da mistura de biodiesel e de etanol, respectivamente, no diesel e na gasolina, e que, de modo mais amplo, almeja a substituição dos combustíveis fósseis tipicamente empregados nos transportes rodoviário, marítimo e aéreo por combustíveis alternativos não carbono-intensivos. Portanto, a Lei do Combustível do Futuro representa um mecanismo com potencial para fomento à descarbonização da matriz de transportes e da mobilidade no Brasil.

intensivo de água e a contaminação por agrotóxicos, além da perda de biodiversidade. Em termos sociais, a expansão da produção para atender à demanda internacional muitas vezes acarreta conflitos fundiários, concentração de terras, expulsão de comunidades tradicionais e condições precárias de trabalho, especialmente no corte de cana. No plano econômico, o setor é marcado por forte volatilidade de preços, dependência de subsídios e vulnerabilidade a flutuações do mercado externo, além de promover um modelo de desenvolvimento agroexportador que nem sempre se traduz em benefícios locais. Esses efeitos levantam questionamentos importantes sobre a real sustentabilidade da cadeia dos biocombustíveis, especialmente em contextos como o brasileiro (Gilio et al., 2024).

### ***O futuro da energia para motorização no Brasil***

Muito provavelmente, o futuro da energia para motorização no Brasil há de ser marcado por uma matriz híbrida, com forte presença de biocombustíveis, eletrificação gradual e avanços no emprego do H<sub>2</sub>V. Neste sentido, destaca-se, o Brasil, dispõe de robustas opções: etanol, biodiesel<sup>16</sup>, HVO, hidrogênio, eletricidade ou biometano. Além disso, políticas públicas como MOVER<sup>17</sup> (Programa

<sup>16</sup> Há de se ressaltar que existem limites técnicos e físicos associáveis a se misturar biocombustíveis em combustíveis fósseis. Tais limites são correlatos a problemas de corrosão e de compatibilidade mecânica, exigências de desempenho e de emissões, diferenças químicas, riscos nas etapas de armazenamento e transporte. Portanto, estabeleceu-se no Brasil e em outros países usuais de tal procedimento, este teto (máximo de mistura) é de 14% de biodiesel no diesel, e de 30% de etanol na gasolina (ANP, 2025).

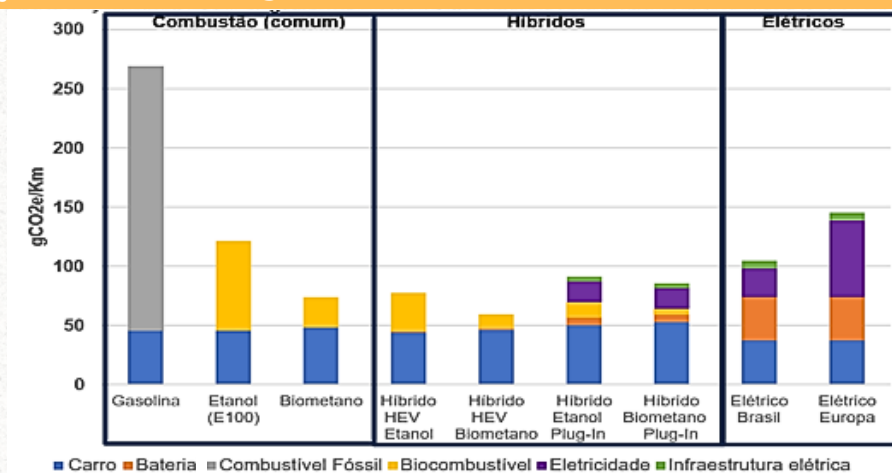
<sup>17</sup> O Programa MOVER, criado pela Lei Federal 14.902 de 2024, é uma política industrial de fomento à industrialização, é uma iniciativa do governo brasileiro, liderada pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), que visa descarbonizar os veículos, impulsionar a inovação e a sustentabilidade na indústria automotiva nacional. O programa oferece incentivos fiscais para empresas que investem em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e produção de veículos mais eficientes e menos poluentes, como elétricos e híbridos, e cria o conceito de "IPI Verde", que reduz impostos para veículos com menor emissão de carbono. O MOVER prevê limites mínimos de reciclagem na fabricação dos veículos e a criação do IPI Verde, um sistema no qual quem polui menos paga menos imposto. O Mover prevê um total de R\$ 19,3 bilhões de créditos financeiros entre 2024 e 2028, que podem ser usados pelas empresas para abatimento de impostos federais em contrapartida a investimentos realizados em P&D e em novos projetos de produção.

Mobilidade Verde e Inovação), Combustível do Futuro, PLANTE<sup>18</sup> (Plano Nacional de Transição Energética), PAC Verde<sup>19</sup> e o RenovaBio<sup>20</sup> têm o potencial de alicerçar e articular adequadamente as tecnologias e as ações em prol de fomentar, concomitantemente, renovabilidade energética e descarbonização.

A despeito da obviedade intrínseca, urge frisar que os veículos elétricos (BEV), durante seu uso, diretamente, não emitem GEE. Porém, é necessário considerar o ciclo energético completo associável a esse tipo de veículo, particularmente quando se observa que nem sempre os BEV são mais eficientes, em termos de emissões de CO<sub>2</sub> e, do que os veículos com motorização tradicional (à gasolina ou a diesel). Há de se considerar, também, as emissões de GEE associáveis à mineração de metais essenciais ao BEV, tais como cobre, lítio e cobalto, assim como as emissões de GEE

decorrentes do tipo de usina energética que gerou a eletricidade supridora dos BEV; se for, por exemplo, uma forma de geração mais tipicamente vinculável a uma usina termelétrica a carvão mineral, podem ser elevadas as efetivas emissões de CO<sub>2</sub> e de determinado BEV (Gauto et al., 2023; Gilio et al., 2024). No caso do Brasil, devido à ampla participação de fontes renováveis na oferta total de energia elétrica (87%, em 2022, segundo a EPE, 2024), os BEV emitem menos CO<sub>2</sub> e do que aqueles em circulação, por exemplo, na Europa, tal como evidenciam os dados da Figura 8.10. No entanto, caso ocorram maiores acionamentos de usinas termelétricas fósseis, por exemplo aquelas a carvão mineral em operação na Região Sul do Brasil, em alguma medida o fator de emissão do SIN, a depender da composição da oferta energética, pode aumentar, tornando os veículos elétricos menos ambientalmente atraentes ao país.

**Figura 8.10 - Comparativo de emissões (ciclo completo) de diferentes tipos de motorização e fontes energéticas**



Fonte: Gilio et al. (2024) a partir de Gauto et al. (2023).

<sup>18</sup> O PLANTE é o plano de ações de longo prazo do governo brasileiro para concretizar os objetivos da Política Nacional de Transição Energética (PNTE), o qual visa uma matriz energética mais sustentável, com baixa emissão de carbono. O PlanTE busca alinhar esforços para a descarbonização da economia, atrair investimentos na economia verde, gerar empregos e combater a pobreza energética, com foco em recursos naturais renováveis, tais como: energia solar (Sol), energia eólica (ventos), ventos biomassa e hidrogênio verde (H2V). O PLANTE foi concebido quando o CNPE (Conselho Nacional de Política Energética), em 24 de agosto de 2024, criou o PNTE.

<sup>19</sup> O "PAC Verde" refere-se à incorporação de projetos de sustentabilidade e transição energética no Novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do Brasil, focado em investimentos para um desenvolvimento mais ecológico, incluindo energias renováveis, mobilidade sustentável, urbanização de favelas, gestão de resíduos e proteção ambiental, visando a geração de emprego e renda de forma mais sustentável. O "PAC Verde" foi lançado, pelo Governo Federal, em 11 de agosto de 2023.

<sup>20</sup> O RenovaBio é uma política de Estado que reconhece o papel estratégico dos biocombustíveis (etanol, biodiesel, biometano, bioquerosene, segunda geração, entre outros) na oferta primária de energia do Brasil no que se refere à sua contribuição para a segurança energética, a previsibilidade do mercado e a mitigação de emissões dos gases causadores do efeito estufa no setor de combustíveis. Com isso, os biocombustíveis viabilizam uma oferta de energia cada vez mais sustentável, competitiva e segura. A Política Nacional de Biocombustíveis, ou RenovaBio, foi estabelecida, após sanção da lei Nº 13.576/17, que definiu metas de descarbonização relacionadas ao uso de biocombustíveis. O RenovaBio é composto por três eixos estratégicos: 1) Metas de Descarbonização; 2) Certificação da Produção de Biocombustíveis; e 3) Crédito de Descarbonização (CBIO). Cabe ainda citar que os principais objetivos do RenovaBio são: (a) Atendimento aos compromissos inerentes ao Acordo de Paris; (b) Aliar eficiência energética e redução de emissões ao longo do ciclo de vida; (c) Promover a produção e uso de biocombustíveis; e (d) Proporcionar a previsibilidade da participação dos biocombustíveis no mercado. O RenovaBio, que, de fato, significa importante arcabouço regulatório em prol da descarbonização do setor energético do Brasil, vem enfrentando dificuldades, principalmente por haver momentos em que a oferta de CBIOs não acompanha a demanda criada pelas metas, além de relatos de inadimplência por parte de distribuidoras (não comprarem créditos necessários). Isso gera falta de previsibilidade e problemas operacionais na bolsa de CBIOs. Outrossim, os créditos de descarbonização (CBIOs) têm apresentado forte oscilação e, em alguns momentos, preços elevados, o que pressiona o custo das distribuidoras e pode repercutir no preço final do combustível ao consumidor (NEVES e DUTRA, 2024).

### **O uso de energia pelo setor industrial e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas**

No que tange ao setor industrial, que respondeu, em 2022, por expressivos 32% das emissões de GEE relacionadas à energia no Brasil (SEEG, 2023), é mister substituir amplamente o carvão mineral e o óleo combustível por eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, biogás e biomassa, assim como modernizar equipamentos e processos industriais de alto consumo energético e carbono-intensivos. Nesse contexto, também é oportuno implementar programas voltados à gestão energética, tais como sistemas de cogeração mais eficientes e o Procel Indústria (o Procel é o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica e foi criado em 2000, tendo sido amplamente reformulado em 2016).

Adicionalmente, nesse contexto, também é relevante adotar estratégias de economia circular e de reuso de matérias, aumentar o reaproveitamento de resíduos industriais (particularmente no caso da indústria do cimento, na siderurgia e na produção de papel/celulose), aprimorar e mensurar a eficiência industrial relacionável a métricas de carbono, e adotar processos voltados à descarbonização em todas as etapas produtivas e à captura e armazenamento de carbono (CCS/CCUS) em setores industriais com emissões de processo (refino, química e cimento, por exemplo). Há de se ressaltar, porém, que o CCS/CCUS enfrenta diversos obstáculos econômicos (custos, competitividade), regulatórios (marcos indefinidos ou frágeis), sociais (aceitação por parte de movimentos ambientalistas, em especial) e técnicos (energia, armazenamento, complexidade).

### **O uso de energia pelo setor residencial e perspectivas de mitigação das emissões de GEE associadas**

No que se refere ao setor residencial, responsável, em 2022, por 10,7% das emissões de GEE associadas à energia no Brasil (SEEG, 2023), é crucial a redução no consumo energético com vistas a se atenuar a carga sobre o Sistema Interligado Nacional (SIN), particularmente em períodos de seca e, portanto, de menor geração hidrelétrica.

Nesse contexto, as mais relevantes estratégias para abatimento das emissões de GEE pelo consumo de energia nas residências brasileiras combinam mudanças de comportamento, dispositivos inteligentes (smart plugs, timers e sensores) e tecnologias eficientes (em prol de lâmpadas, chuveiros elétricos, condicionadores de ar, ferros de passar roupa e geladeiras mais eficientes), assim como a adoção de determinadas políticas públicas, como aquelas voltadas à redução de custos para instalação de aquecedores solares (por exemplo por meio de mais subsídios para a energia solar fotovoltaica residencial) e de biodigestores (para geração de energia para cocção, e com o cobenefício da gestão sustentável de resíduos) em comunidades socioeconomicamente vulnerabilizadas.

Ainda no que tange ao setor residencial, deve-se criar e implementar estratégias e ações visando tornar mais eficiente e acessível o mercado cativo de eletricidade, aquele no qual os consumidores residenciais (além de consumidores de baixa tensão e pequenos comércios) compram energia exclusivamente das distribuidoras locais (ENEL e Light, por exemplo). Afinal, tanto a distribuidora, que fatura via tarifa volumétrica (quanto mais kwh consumido maior o faturamento) como nos seus mercados cativos, onde o preço da eletricidade é fixado e não negociável, também os consumidores, têm menos estímulos para adotar soluções como a eficiência e a autoprodução energética, comparativamente aos grandes consumidores que adquirem energia elétrica do mercado livre (grandes indústrias e comércios, em especial). Portanto, uma revisão na composição das parcelas A (compra de energia das distribuidoras) e B (custo da distribuição) nas tarifas de eletricidade, bem como incentivos para remuneração por eficiência e não consumo, podem induzir à redução das emissões de GEE. Além disso, os consumidores residenciais de eletricidade no Brasil são mais vulneráveis a crises hídricas do que os grandes consumidores do mercado livre (no qual os consumidores negociam diretamente com geradores ou com comercializadores de energia); e isto pelo fato de o SIN ser amplamente dependente de usinas hidrelétricas, o que acarreta em aumento de

bandeira tarifária do mercado cativo durante os períodos de seca. Embora seja possível observar mercados energéticos cativos mais competitivos, como o caso estadunidense, ainda assim, as tarifas continuam volumétricas, incentivando a venda de kwh como principal modo de aumentar o faturamento das distribuidoras.

## O setor de energia no Brasil pela perspectiva da justiça ambiental: Análise com foco na necessidade de superação de entraves à Transição Energética Justa

No seio da militância socioambiental estadunidense da década de 1970, surge a justiça ambiental, uma ideia e uma práxis contra a desigualdade de distribuição dos impactos ecológicos da atividade humana pela população. Com a intensificação dos debates acerca deste tema, a justiça ambiental adentrou o meio acadêmico, onde foram iniciados os esforços para sistematizar seus princípios e métodos. A partir desta dupla frente, a justiça ambiental reivindica justiça social e equidade no uso da terra e na exploração de recursos naturais (recursos energéticos, recursos florestais, recursos minerais e recursos hídricos, por exemplo).

Fundamentalmente, a preocupação da justiça ambiental é com o tratamento equitativo dos cidadãos em relação às externalidades positivas e negativas correlatas a questões ambientais, assim como o envolvimento da população nos processos de regulações ambientais e de

tomada de decisão de políticas (Heffron, 2018).

Uma definição bastante precisa sobre a justiça ambiental é aquela desenvolvida por Herculano (2002), que a define como conjunto de princípios que asseguram que nenhum grupo de pessoas, sejam grupos étnicos, raciais ou de classe, suporte uma parcela desproporcional das consequências ambientais negativas de operações econômicas, de políticas e programas federais, estaduais e locais, bem como resultante da ausência ou omissão de tais políticas.

Uma análise transversal a respeito da justiça ambiental no Brasil evidencia que, a despeito de determinadas políticas de governo (tal como o Plano de Transformação Ecológica, criado, em 2023, pelo Ministério da Fazenda e que coteja o eixo Transição Energética) ou de iniciativas lideradas pela sociedade civil (tais como o MAB, o Movimento dos Atingidos por Barragens, e a Rede Brasileira de Justiça Ambiental), histórica e presentemente, há uma séria de casos de violações deste conceito, particularmente no que se refere a violações dos direitos dos povos indígenas, quilombolas e comunidades tradicionais, tais como ribeirinhos, caiçaras, pescadores artesanais ou quebradeiras de coco babaçu (Mendes, Sampaio e Collaço, 2025).

Neste contexto, destaca-se que, em 2024, cerca de 1,2 milhão de pessoas ainda não possuíam conexão com a rede elétrica (Agência Gov, 2025). Tal contingente de pessoas ainda não atingidas por estratégias e ações de universalização do acesso à energia elétrica (como o Programa Luz para Todos, uma política pública criada, em 2003, pelo Governo Federal e que retirou da exclusão elétrica cerca de 17,5 milhões de pessoas no Brasil), majoritariamente, são habitantes da Amazônia Legal, que, paradoxalmente, respondeu, em 2021, através das UHE lá instaladas e em operação, pela geração de 27% da energia elétrica no Brasil (EPE, 2024); e é na Amazônia Legal que diversos municípios dependem de sistemas isolados movidos a óleo diesel, o que implica em fornecimento energético de alto custo, intermitente e mais poluente, ampliando, assim, a distribuição desigual das externalidades energéticas (IDEC, 2024).

Destarte, tipicamente no Brasil o acesso à energia, em boa medida, por ser compreendido como fonte de desigualdade socioespacial. Tal como aponta estudo conduzido por Lazaro e Soares (2024), enquanto na Região Sudeste há relativamente baixa independência energética, a Região Nordeste se destaca em segurança energética, ainda que tal aspecto positivo se relacione a crescentes impactos socioambientais correlatos a usinas hidrelétricas em operação na região e à implementação de novos empreendimentos de energias renováveis. Por sua vez, as regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste apresentam melhores níveis de equidade energética do que as regiões Norte e Nordeste. Tais achados indicam a necessidade de políticas energéticas, nacionais e subnacionais, que coadunem, em nível regional, governança e dimensões socioeconômicas, de modo que seja fomentada uma transição energética efetivamente justa no país (Lazaro e Soares, 2024).

Em 2023, 12,7 milhões de famílias brasileiras (cerca de 15,2% dos domicílios brasileiros) ainda cozinhavam exclusivamente com lenha ou carvão vegetal (IBGE, 2025). Além disso, cerca de 10 mil famílias, em sua maioria pescadores e indígenas, tiveram que abandonar suas casas devido à inundação de 512 quilômetros quadrados para a construção do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte, no rio Xingu (Bermann, 2012). Tal contexto, por se, exemplifica algumas das alarmantes injustiças ambientais relacionadas ao sistema energético brasileiro.

Cabe mencionar que à época do lançamento do Relatório Geo Brasil 1<sup>21</sup> (intitulado GEO Brasil 2002 – Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil), ou seja, há cerca de 23 anos, aproximadamente 24 milhões de brasileiros utilizavam lenha ou carvão mineral para

cozimento. Este dado advém da PNAD/IBGE 2002, que apontava que, em 2001, cerca de 28% dos domicílios no país ainda faziam uso da lenha como principal combustível para preparo de alimentos, principalmente em áreas rurais e em regiões mais socioeconomicamente vulnerabilizadas do Brasil. Não descabidamente, portanto, o Relatório Geo Brasil 1, de 2002, enfatizava a importância da substituição da lenha e do carvão vegetal em prol de eficiência energética e objetivando mitigar problemas à saúde humana, afinal, especial em ambientes fechados (poluição indoor), fogões a lenha são extremamente prejudiciais à saúde.

Estudos diversos comprovam a desigualdade de capacidades em relação à energia no Brasil. Destarte, no país os mais pobres sofrem mais com os efeitos da poluição do ar; as populações indígenas e as comunidades ribeirinhas são as mais afetadas pela instalação de infraestruturas para geração hidrelétrica (em especial, devido à necessidade de deslocamento de consideráveis contingentes humanos para construção das represas), solar e eólica; e, se pode dizer que a população, em especial os menos favorecidos socioeconomicamente, tem dificuldade em se manifestar nos processos decisórios sobre projetos energéticos, seja por falta de espaço em veículos de imprensa ou pelo lobby exercido junto a governos (nos níveis federal, estadual e municipal) por empresas do setor energético (Bermann, 2012; Zhouri, 2014; Costa e Goldbaum, 2017; Frate et al., 2019; Lozornio e Simões, 2022; Relatório Luz, 2024).

Como exemplos mais específicos de casos de ausência de justiça ambiental no setor energético brasileiro, poder-se-ia mencionar: (1) A exploração de uma mina de cobre, no Município de Craíbas, em Alagoas, tem causado conflitos com as comunidades indígenas Karapotó, Tingui Botó e Kariri-

<sup>21</sup> A respeito do Relatório "GEO Brasil 2002 – Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil" (ou seja, o Relatório GEO Brasil 1), acessível a partir de acesso ao endereço eletrônico "[https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/site\\_cnia/geo\\_brasil\\_2002.pdf](https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/site_cnia/geo_brasil_2002.pdf)", cabe mencionar que havia ênfase na conservação de energia, ainda que com foco prioritário na energia elétrica e, quase que exclusivamente, através de ações do PROCEL, um Programa do Governo Federal, lançado em 1985, e cuja sigla significa "Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica" e que é focado no fomento ao uso eficiente da energia elétrica e no combater o seu desperdício. A sua principal ferramenta é o Selo Procel, uma etiqueta que sinaliza quais eletrodomésticos e equipamentos mais econômicos e eficientes estão disponíveis no mercado, permitindo que o consumidor faça escolhas mais ambientalmente conscientes. O relativamente discreto foco do Relatório "GEO Brasil 2002 – Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil" em estratégias e iniciativas voltadas à redução do consumo de combustíveis fósseis no Brasil e, também, na necessidade de diversificação da oferta energética do país (ou, em terminologia contemporânea, na necessidade de se realizar uma transição energética justa), em boa medida, se deve a ainda não plena disseminação no seio da população brasileira e mundial sobre as consequências das mudanças climáticas e do aquecimento global. De fato, em 2002, a acurácia científica em relação às causas e quanto aos impactos das mudanças climáticas era tipicamente menor, comparativamente à atualidade (IPCC, 2022). Destarte, o supracitado Relatório "GEO Brasil 2002 – Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil", compreensivelmente, pouco incisivamente aborda as energias solar fotovoltaica e eólica.

Xokó – tais comunidades vem relatando a ausência de consulta e impactos ambientais (tal como rachaduras em residências) (Mapa de Conflitos, 2025); (2) A Construção do Sistema de Transmissão Gralha Azul, no Paraná, vem enfrentando oposição por parte de comunidades indígenas, quilombolas e tradicionais devido a impactos ambientais, como a derrubada de (árvores) araucárias, e em vista da ausência de consulta prévia (Mapa de Conflitos, 2025); (3) O Complexo Eólico Canudos II, na Bahia, vem recebendo críticas diversas por partes de comunidades tradicionais de fundo e fecho de pasto (caracterizadas pela criação de animais soltos e em terras coletivas – ou seja, pasto em mata nativa –, pela coleta de frutos e pela pequena produção agrícola), as quais relatam impactos à fauna local (como à arara-azul-de-lear), destruição da vegetação nativa e invasão de territórios tradicionais – em 2022, 60 organizações da sociedade civil denunciaram este projeto ao Alto Comissariado das Nações Unidas para os Direitos Humanos (ACNUDH), frisando os impactos socioambientais negativos e a ausência de consulta prévia (Mapa de Conflitos, 2025); e (4) Considerando dados atualizados até setembro de 2024, há, no país, 426 blocos contratados em operações de E&P de petróleo e gás natural, sendo 282 terrestres e 144 marítimos (EBC, 2024) - tais atividades afetam, em níveis diversos, 56 Terras Indígenas (TI), o que representa 28% do total das TI do Brasil ( Instituto Internacional Arayara 2024).

Apesar do entendimento sobre a necessidade da urgência da transição energética, o Brasil tem se caracterizado por importante expansão de projetos de exploração e produção (E&P) de petróleo e gás natural, geração energética e transporte de derivados de petróleo e gás natural; tais projetos, frequentemente, expõem as minorias étnicas à degradação ambiental e, concomitantemente, ampliam a exclusão energética. Em boa medida se insere neste contexto a proposta de E&P de petróleo e gás natural, liderada pela Petrobras e por diversas companhias petrolíferas multinacionais, em região relativamente próxima da Foz do Rio Amazonas (a cerca de 500 km) e na Margem Equatorial Brasileira,

ainda que seja possível, neste caso, fazer a ressalva de que numa eventual reestruturação dos royalties em prol de fundos soberanos ampliados, provavelmente parte do histórico déficit socioeconômico das regiões Norte e Nordeste seria mitigado.

Uma medida em prol da justiça ambiental e, concomitantemente, na direção da eficiência energética e da transição energética justa no Brasil refere-se à necessidade de gradativo descomissionamento das usinas termelétricas a combustíveis fósseis instaladas no país. Corroborando para esta recomendação, estudo realizado pela ONG Instituto de Energia e Ambiente, publicado em dezembro de 2024 (IEMA, 2024), que explicitou que, em 2023, as 67 termelétricas fósseis (movidas a carvão mineral, óleo diesel ou gás natural) conectadas ao SIN emitiram 17,9 MtCO<sub>2</sub>, valor superior às emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela mais populosa (11 milhões de habitantes) e economicamente relevante (10,3% do PIB do Brasil, em 2019) cidade do país, qual seja, São Paulo, que, no mesmo ano, emitiu 14,5 MtCO<sub>2</sub> (IEMA, 2024; SEEG, 2024). A resiliência das termelétricas a combustíveis fósseis no seio da oferta energética nacional deve-se, centralmente, à alegada (por parte dos stakeholders do setor energético brasileiro) busca por maior segurança energética (correlatamente à crise hídrica de 2001 e à intermitência inerente às usinas fotovoltaicas e eólicas) e ao forte lobby da indústria do gás natural e do carvão mineral atuante no Congresso Nacional, no Senado Federal e em assembleias legislativas estaduais de estados com marcante presença de usinas termelétricas fósseis (IEMA, 2024).

Sob a égide de tais considerações, a transição energética justa no caso do Brasil, invariavelmente, deve seguir três princípios: justiça (ambiental, social, econômica e energética), democracia participativa e inclusão social, a qual, no contexto da energia, podemos alcunhar como inclusão energética no meio urbano e em comunidades remotas. E, de modo mais amplo, para o setor energético brasileiro como um todo, a efetiva inserção da componente justiça ambiental requer o delineio ou o aprimoramento de políticas energéticas públicas e privadas que considerem como prioritário o respeito aos direitos dos povos indígenas, quilombolas e

das comunidades tradicionais, viabilizando, deste modo, a efetiva participação nos processos decisórios das populações impactadas (ou com potencial de serem impactadas); outrossim, é fundamental que haja distribuição justa das externalidades positivas e dos impactos vinculáveis a empreendimentos de geração energética.

Complementarmente, cabe mencionar exemplos brasileiros de boas práticas de participação comunitária e de soluções em nível de compensação mais equitativa que podem ser exitosas no âmbito da almejada transição energética justa. Neste contexto, poder-se-ia citar o Decreto 11.659/2023, um mecanismo de compensação financeira, que modifica os percentuais de repasse da CFEM<sup>22</sup> visando garantir que municípios impactados pela atividade de mineração ou por infraestrutura mineral (barragens de rejeitos, minerodutos e ferrovias, por exemplo) recebam uma parcela dos recursos (ou seja, não mais somente os municípios produtores não de receber uma parcela de tais recursos). Esse decreto, em última instância, objetiva dobrar o impacto social desses recursos, disponibilizando-os para investimentos em educação, saúde, saneamento e segurança dos municípios que, essencialmente, sofrem os impactos diretos da mineração. Nesse mesmo contexto, urge também citar os Editais do Fundo Brasil<sup>23</sup> (“Fortalecendo Soluções de Povos Indígenas, Comunidades e Trabalhadoras/es rumo à Justiça Climática e à Transição Justa” e “Transição Justa e Trabalho Digno”), os quais fomentam iniciativas embrionadas nas próprias comunidades, tais como: bancos de sementes, cozinhas comunitárias, energia solar comunitária, agroecologia, pontos de

trabalho local, participação em espaços de decisão ou ainda reforços da organização comunitária.

Nesse sentido, também é possível mencionar as iniciativas conduzidas pela Revulusolar<sup>24</sup>, uma organização que atua em comunidades de baixa renda e promovendo cooperativas de energia solar, capacitação e autogestão, que, por exemplo, no caso da cooperativa de energia solar da Babilônia, na cidade do Rio de Janeiro, contou com apoio das famílias locais e participação direta da comunidade, inclusive quanto a apoio técnico. E ainda cabe citar: (a) O Programa de Infraestrutura Comunitária (Projeto Saúde & Alegria<sup>25</sup>, em Alto Tapajós, no Pará), que já beneficiou cerca de 2.700 pessoas e que visa a instalação de sistemas solares fotovoltaicos em aldeias indígenas, a melhoria do acesso a serviços básicos, em particular o abastecimento de água potável com emprego de energia solar; (b) Palma Solar<sup>26</sup>, no Ceará, uma iniciativa baseada na participação das mulheres, baseia-se em economia solidária focada em energia solar comunitária e solidária, e conta com o envolvimento de instituições locais (IFCE – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará –, Banco Palmas e comunidades locais) – o objetivo é beneficiar famílias de baixa renda por meio da redução nos valores das contas de luz; e (c) Projeto Boa Vista Sustentável<sup>27</sup> (Território Quilombola, Barcarena, Pará), focado na implementação de painéis solares fotovoltaicos em residências e centro comunitário, objetivando fomento à democratização do acesso à energia, aumento de autonomia local e redução de custo.

<sup>22</sup> A Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM –, foi estabelecida pela Constituição Federal de 1988.

<sup>23</sup> O Fundo Brasil (<https://www.fundobrasil.org.br/conheca-o-fundo-brasil/>), instituído oficialmente em 2006, é uma fundação independente, sem finalidades de lucro, criada por ativistas que objetiva fortalecer as organizações da sociedade civil na luta por direitos humanos.

<sup>24</sup> Informações adicionais podem ser obtidas por meio de acesso ao seguinte endereço eletrônico: [revulusolar.org.br](http://revulusolar.org.br).

<sup>25</sup> Informações adicionais podem ser obtidas por meio de acesso ao seguinte endereço eletrônico: [saudeealegria.org.br](http://saudeealegria.org.br).

<sup>26</sup> Informações adicionais podem ser obtidas por meio de acesso ao seguinte endereço eletrônico: <https://www.trabalho.ce.gov.br/2025/04/25/palma-solar-seminario-apresenta-iniciativa-de-fornecimento-de-energia-solar-comunitaria-e-solidaria-em-fortaleza/>.

<sup>27</sup> Informações adicionais podem ser obtidas por meio de acesso ao seguinte endereço eletrônico: <https://www.barcarenasustentavel.org/conexoes-sustentaveis/projetos-cbe/projeto-social-boa-vista-sustentavel/>.

## Considerações finais

A oferta energética brasileira é reconhecida internacionalmente pela expressiva participação de fontes renováveis em sua composição, que atingiu 50,5% da oferta interna de energia primária em 2023, índice amplamente superior à média mundial de 14,6%. Entretanto, a outra metade da oferta energética nacional ainda é composta por fontes fósseis, sobretudo petróleo e gás natural, cuja produção e exportação expandem-se, impulsionadas principalmente pela produção a partir da camada Pré-Sal. Na produção de eletricidade, o Brasil apresenta uma oferta majoritariamente renovável (89%, em 2023), com domínio de hidrelétricas, eólicas e solares. Entretanto, a rápida expansão das renováveis modernas trouxe desafios para o planejamento energético, tais como: a intermitência das fontes, impactos socioambientais deletérios, conflitos territoriais e pressões sobre estilos de vida tradicionais e rurais que afetam desproporcionalmente comunidades tradicionais, indígenas e quilombolas.

O país enfrenta dificuldades para avançar nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7), com estagnação principalmente no acesso universal à energia e insuficiência nos ganhos de eficiência energética. As transições energéticas brasileiras têm sido marcadas por profundas desigualdades regionais e sociais, evidenciadas tanto na exclusão energética de populações vulneráveis quanto na distribuição desigual dos impactos negativos dos grandes projetos. Políticas públicas como o PROINFA<sup>28</sup>, PROCONVE<sup>29</sup>, RenovaBio, o Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono e incentivos à geração distribuída, de fato, buscam mitigar as emissões de gases de

efeito estufa (GEE), mas o volume de subsídios destinados às fontes fósseis ainda supera amplamente os subsídios voltados às renováveis.

A justiça ambiental, por sua vez, permanece um desafio fulcral para o planejamento energético nacional, exigindo a efetiva participação das populações impactadas nos processos decisórios, a distribuição equitativa dos benefícios e dos impactos dos empreendimentos energéticos, e o fortalecimento de mecanismos de consultas e poderes de veto. Para que as transições energéticas sejam justas no Brasil e voltadas a práticas de mitigação dos impactos da expansão energética, inclusive de fontes renováveis, se faz necessária a integração entre políticas sociais, energéticas e climáticas, além da desagregação regional para estratégias de descarbonização, financiamento público que foque em renováveis e não em fósseis e, sobretudo, o respeito aos direitos das populações indígenas, quilombolas e tradicionais.

Os desafios são amplos e complexos no que tange a tornar efetivamente sustentáveis as inter-relações entre o setor de energia e o meio ambiente. Nesse contexto, no caso do Brasil é mister que o planejamento energético integre mais amplamente as especificidades das agendas ambientais nacionais e globais; nesta segunda perspectiva, urge frisar que tal integração deve focar, em particular, as metas brasileiras expressas no âmbito do Acordo de Paris (ou seja, a NDC brasileira) e do Marco Global da Biodiversidade de Kunming-Montreal, do qual o Brasil, desde 2022, é signatário.

Destarte, os nexos entre energia e meio ambiente no Brasil são fortes, afinal o país se caracteriza por uma oferta energética tipicamente renovável, porém ainda marcada por significativas pressões ambientais; nesse sentido, as mais importantes são:

<sup>28</sup>O PROINFA, ou Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, foi um programa governamental brasileiro instituído em 2002 pela Lei nº 10.438 para diversificar a matriz energética nacional e impulsionar o uso de energias renováveis, como eólica, eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). O programa teve um papel importante no desenvolvimento do mercado de energias renováveis no Brasil, fomentando a indústria nacional, a geração de empregos e o avanço tecnológico. Atualmente, a gestão dos contratos do PROINFA é feita pela ENBPar (Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional S.A.).

<sup>29</sup>O PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) é uma política brasileira criada em 1986 pelo CONAMA para reduzir as emissões de poluentes de veículos automotores, estabelecendo limites de emissões e impulsionando o desenvolvimento tecnológico e o uso de combustíveis mais limpos no país. O programa é dividido em fases, como as Fases L (veículos leves) e P (veículos pesados), que impõem normas cada vez mais restritivas para as montadoras, que precisam adaptar os veículos para atender aos padrões.

\* *Mudanças Climáticas e Segurança Energética.* Nesse contexto, mais destacadamente urge mencionar que alterações no regime de chuvas afetam o funcionamento das usinas hidrelétricas, induzindo a mais acionamento (maior uso) das usinas termelétricas fósseis (a carvão mineral, óleo diesel e gás natural), aumentando, assim, as emissões de GEE pelo Brasil. Outrossim, eventos climáticos extremos, particularmente secas prolongadas, pressionam o SIN;

\* *Energia e Justiça Climática.* Frequentemente, grandes projetos energéticos (usinas hidrelétricas, solares e eólicas) afetam comunidades tradicionais sem a necessária consulta prévia. Além disso, de modo correlato, tem se constatado racismo ambiental e desigualdade no acesso às energias renováveis.

\* *Hidrelétricas,* que representam uma forma de geração baseada em fonte energética renovável, mas com impactos socioambientais relevantes. O benefício energético para o Brasil, associável a este tipo de geração é que as hidrelétricas garantem de 55% a 60% da demanda por eletricidade no país e com baixa emissão de GEE. Por outro lado, há importantes impactos ambientais correlatos ao alagamento de grandes áreas, alteração de ecossistemas aquáticos e perda de biodiversidade. Há, subsequente a tal contexto, o potencial estabelecimento de conflitos socioambientais que afetam, sobremaneira, povos indígenas, quilombolas, comunidades ribeirinhas;

\* *Bioenergia e Biocombustíveis,* os quais, em termos de benefício energético e sob a égide do etanol de cana-de-açúcar e do biodiesel, reduzem a dependência externa por combustíveis fósseis (óleo diesel e gasolina, em especial) e têm menores pegadas de carbono. Por sua feita, em termos de impactos ambientais, urge destacar que a expansão da monocultura da cana-de-açúcar e da soja pode induzir a mais desmatamento indireto, uso intensivo de agrotóxicos e degradação do solo. Cabe ainda mencionar, que a queima da palha de cana-de-açúcar prejudica a qualidade do ar em regiões produtoras;

\* Desmatamento e uso da terra ligados ao setor energético. A este respeito, frisa-se que lenha e carvão vegetal ainda são muito utilizados como energéticos pelo setor industrial, particularmente na siderurgia e no subsetor de cerâmica. Neste sentido, cabe destacar que o desmatamento ilegal para extração de lenha e produção de carvão vegetal contribui, notadamente, para a perda de biodiversidade e para o aumento das emissões brasileiras de CO<sub>2</sub>;

\* Combustíveis fósseis e o Pré-Sal, cujo benefício energético se associa à produção de petróleo e gás natural, fortalecendo, assim, a economia e a segurança energética do país. Há, porém, nesse contexto, revezes ambientais expressivos, tais como o risco de vazamento e acidentes (offshore), a contribuição para o aumento das emissões de GEE pelo Brasil, dificultando o atingimento das NDC do país perante o Acordo de Paris. Nesse mesmo contexto, é possível citar que a expansão da infraestrutura para transporte de combustíveis fósseis se relaciona a uma maior pressão aos ecossistemas terrestres e aquáticos.

\* Energia Solar e Eólica, cujas externalidades ambientais positivas se relacionam ao fato de serem formas de geração de eletricidade a partir de fontes energéticas primárias renováveis (Sol e ventos, respectivamente), e, assim, auxiliam na descarbonização do setor energético e, mais amplamente, da economia brasileira. Há, no entanto, impactos ambientais associáveis a conflitos de uso da terra (particularmente no caso de usinas eólicas no Semiárido e de usinas solares em áreas agricultáveis), degradação de habitats, impacto visual, potencial impacto para rotas migratórias de pássaros (usinas eólicas), além de desafios técnicos e econômicos correlatos ao descarte de painéis solares fotovoltaicos no final da vida útil.

Cabe ainda destacar que, na medida em que o Brasil é dos mais socioeconomicamente desiguais países do mundo e que a pobreza energética é manifestação da injustiça ambiental (e, portanto, também da injustiça climática), a necessária maior integração entre políticas energéticas e ambientais, fundamentalmente, deve contemplar estratégias e ações voltadas à redução da pobreza e da miséria no Brasil.

## Recomendações prioritárias

Na forma de tópicos, a seguir, são elencadas as ações mais urgentes em prol da redução de problemas ambientais, socioambientais e socioeconômicos associáveis ao setor energético do Brasil:

- \* Criação e/ou aprimoramento de regulações específicas voltadas à implementação e operação de usinas eólicas (*onshore* e *offshore*) e de usinas solares centralizadas;

- \* Transições energéticas para fontes menos poluentes e modernas (particularmente, solar e eólica) têm reproduzido no Brasil padrões de exploração de fontes tradicionais (fósseis, hidrelétrica), ocasionando, muitas vezes, despossessão de terras e supressão de culturas e de estilos de vida. Assim, com sentido de urgência, políticas e planos de expansão da oferta energética têm de passar a ser devidamente transversalizados com as noções de justiça energética;

- \* Fortalecimento das entidades da sociedade civil e fiscalizatórias do meio ambiente (IBAMA e ICMBio, em nível federal; e as Secretarias Estaduais de Meio Ambiente e os órgãos ambientais municipais, em nível subnacional);

- \* Aumento da participação independentemente e informada das populações mais diretamente afetadas por grandes empreendimentos energéticos;

- \* Criação de fundos soberanos com os excedentes do Pré-Sal, com foco na substituição gradativa dos combustíveis fósseis;

- \* Políticas públicas e privadas devem focar atenções no fomento ao desenvolvimento científico e tecnológico capaz de oportunizar aos atores diversos envolvidos com o setor energético do país ainda mais eficazes estratégias e ações indutoras de redução nas emissões de GEE;

- \* No que se refere ao nexus água-alimento-energia, é premente o desenvolvimento de políticas públicas intersetoriais na medida em que há,

notadamente, carência de planejamento articulado do nexus;

- \* O fortalecimento do nexus água-alimento-energia depende do aumento da eficiência no uso da água na agricultura, expansão de energias renováveis não hídricas (solar e eólica, em particular), reuso de água em cidades, redução de perdas (tanto de alimentos quanto de água e energia), além de incentivo à bioeconomia;

- \* É fundamental estabelecer amplo debate envolvendo poder público, universidades e comunidades locais que convirja para um arcabouço institucional próprio para o licenciamento de projetos energéticos renováveis que ultrapassem 5 MW de potência instalada, e, de modo correlato, fiscalizar e penalizar o avanço dos megaprojetos eólicos que desmatem o Semiárido;

- \* A redução de problemas associáveis à intermitência associáveis à geração solar e eólica, deve priorizar as seguintes estratégias e ações: (1) Armazenamento energético a partir de baterias de lítio para equilíbrio de curto prazo (Exemplo: baterias conectadas a parques solares na Região Nordeste) e seu respectivo descarte e condicionamento ou reciclagem; (2) Usinas reversíveis (bombeamento hidráulico) usam a energia excedente para bombear água para reservatórios, liberando-a posteriormente; (3) Armazenamento químico, que se relaciona à produção de Hidrogênio Verde (H2V) a partir do excedente solar/eólico, que, subsequentemente, pode ser utilizado em usinas térmicas ou no setor de transporte;

- \* Políticas climáticas voltadas à redução das emissões de GEE no Brasil devem se voltar, prioritariamente, ao delineamento de estratégias e ações mais tipicamente regionalizadas e, assim, em níveis subnacionais;

- \* Reduções mais expressivas das emissões de GEE pelo setor energético do Brasil se relacionam, intrinsecamente, com mais conexões e inter-relações entre as políticas (e as prioridades) energéticas e climáticas;

- \* No caso do setor de transporte, o principal contribuinte setorial para as emissões de GEE relacionáveis à energia no país, é fundamental que sejam priorizadas

ações voltadas à melhoria da economia de combustível, e que políticas (de âmbito federal, principalmente) foquem na mudança para modais de baixo carbono (prioritariamente, os ônibus e os trens elétricos, a navegação de cabotagem e o transporte por meio de veículos de propulsão humana, em especial a bicicleta), assim como ampliar as sinergias entre a geração energética e os meios de transporte;

\* No caso do setor industrial, a mitigação das emissões de GEE deve priorizar a ampla substituição do carvão mineral e do óleo combustível por eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, biogás e biomassa, assim como modernizar equipamentos e processos industriais de alto consumo energético e carbono-intensivos; também é oportuno implementar programas voltados à gestão energética, tais como sistemas de cogeração mais eficientes;

\* No que se refere ao setor residencial, é crucial a redução do consumo energético com vistas a se atenuar a carga sobre o Sistema Interligado Nacional (SIN), particularmente em períodos de seca e, portanto, de menor geração hidrelétrica. Nesse contexto, as mais relevantes estratégias para abatimento das emissões de GEE combinam mudanças de comportamento, dispositivos inteligentes

(*smart plugs, timers* e sensores) e tecnologias eficientes, assim como a adoção de políticas públicas voltadas à redução de custos para instalação de aquecedores solares e de biodigestores (para geração de energia para cocção, e com o cobenefício da gestão sustentável de resíduos) em comunidades socioeconomicamente vulnerabilizadas;

\* Para o setor energético brasileiro como um todo, a efetiva inserção da componente justiça ambiental requer a elaboração ou o aprimoramento de políticas energéticas públicas e privadas que considerem como prioritário o respeito aos direitos dos povos indígenas, quilombolas e das comunidades tradicionais, viabilizando, deste modo, a efetiva participação nos processos decisórios das populações impactadas (ou com potencial de serem impactadas); é também fundamental que haja distribuição justa das externalidades positivas e dos impactos vinculáveis a empreendimentos de geração energética;

\* É mister que o planejamento energético integre mais amplamente as especificidades das agendas ambientais nacionais e globais; nesta segunda perspectiva, tal integração deve focar, em particular, as metas brasileiras expressas no âmbito do Acordo de Paris (ou seja, a NDC brasileira) e do Marco Global da Biodiversidade de Kunming-Montreal.

# Referências

- ABDE – Associação Brasileira de Desenvolvimento. (2025). **Notícias**. <https://abde.org.br/noticias/>
- ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. (2025). **Nossas notícias**. <https://www.absolar.org.br/noticias/>
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2025a). **Anuário estatístico 2024**. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2025>
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2025b). **Boletim mensal de produção de petróleo e gás natural: Fevereiro de 2025**. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2025/fevereiro.pdf>
- Agência GOV. (2025). **Luz para todos recebe maior volume de investimentos desde sua criação**. <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/primeiro-semester-de-2024-registra-o-maior-investimento-no-luz-para-todos-desde-a-criacao-do-programa>
- Barisano, D. (2021). Green hydrogen through biomass gasification. **Energia, Ambiente e Inovazione**, 1, 101–106. <https://www.eai.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=1222>
- Bermann, C. (2008). Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura**, 60(3), 20–29.
- Bermann, C. (2012). O projeto da Usina Hidrelétrica Belo Monte: A autocracia energética como paradigma. **Novos Cadernos NAEA**, 15(1), 5–23.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia (MME). (2023). **Programa Nacional do Hidrogênio: Plano de trabalho trienal 2023–2025**. Brasília: MME. <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>
- Carramillo, M. P., Pavanelli, J. M. M., de Almeida Collaço, F. M., Marques, T. C. A., Roberto, S. S., & Siqueira, A. M. Q. (2024). When energy transition does not meet energy poverty mitigation: The case of Ceará State in Brazil. In L. L. B. Lazaro, S. de A. Neiva & E. Serrani (Eds.), **Energy poverty, justice and gender in Latin America**. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80068-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80068-9_4)
- CELA. (2024). **Índice LCOX Brasil: Custo nivelado de hidrogênio verde e de amônia verde no Brasil (edição de agosto de 2024)**. [https://cela.com.br/wp-content/uploads/2024/08/20240811\\_LCOX\\_Publico-novo.pdf](https://cela.com.br/wp-content/uploads/2024/08/20240811_LCOX_Publico-novo.pdf)
- Climate Watch. (2024). **Greenhouse gas emissions by sector**. <https://www.climatewatchdata.org/>
- Collaço, F. M. de A., Soares, A. A., Peixoto, E. N., & de Azevedo, D. C. S. (2024). **Atlas do hidrogênio verde no Brasil**. Fortaleza: Editora Universidade Federal do Ceará.
- Costa, D. F., & Goldbaum, M. (2017). Contaminação química, precarização, adoecimento e morte no trabalho: Benzeno no Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, 22(8), 2681–2692.
- Civil Society Working Group for the 2030 Agenda (CSWG). (2024). **Brazil and the 2030 Agenda: Civil society spotlight report 2024**. Brasília: GT Agenda 2030. <https://gtagenda2030.org.br/wp-content/uploads/2024/07/ri-2024-english.pdf>
- De Oliveira, R. C. (2022). **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td\\_2787\\_web.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf)
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) (2021). **Mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro: Panorama atual e potenciais para o hidrogênio verde**. [https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media\\_elements/Mapeamento\\_H2\\_-\\_Diagramado\\_-\\_V2g.pdf](https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf)
- Empresa Brasil de Comunicação (EBC). (2024, setembro 5). ANP registra patamar recorde de áreas de exploração de óleo e gás. **Agência Brasil**. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-09/anp-registra-patamar-recorde-de-areas-de-exploracao-de-oleo-e-gas>
- Energy Institute (EI). (2024). **Statistical review of world energy (73rd ed.)**. <https://www.energyinst.org/statistical-review>

- Energy Institute (EI). (2025). **Energy transition tracker**. <https://www.energyinst.org/statistical-review/energy-transition-tracker>
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2022). **Hidrogênio cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural (Nota Técnica EPE/DPG/SPG/01/2022)**. Brasília: EPE.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2024a). **Caderno de meio ambiente e energia do Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2024**. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2024>
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2024b). **Balço energético nacional 2024: Ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025a). **Balço energético nacional 2025: Ano base 2024 – Relatório síntese**. Rio de Janeiro: EPE.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025b). **Anuário estatístico de energia elétrica 2025**. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025c). **Nota técnica EPE/DEA/SEE/014/2025: Roadmap tecnológico de hidrogênio**. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-899/Roadmap%20H2%20-%20EPE-PTI%20-%20Tecnologia%20\(VF\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-899/Roadmap%20H2%20-%20EPE-PTI%20-%20Tecnologia%20(VF).pdf)
- Fernandes, F. (1975). **Capitalismo dependente e classes sociais na América Latina (2ª ed.)**. São Paulo: Zahar.
- Frate, C. A., Brannstrom, C., de Moraes, M. V. G., & Caldeira-Pires, A. A. (2019). Procedural and distributive justice inform subjectivity regarding wind power: A case from Rio Grande do Norte, Brazil. *Energy Policy*, 132, 185–195.
- Frighetto, M. (2025, julho 9). O impacto para o clima da exploração de petróleo na Foz do Amazonas. **Deutsche Welle/ECO A UOL**. <https://www.uol.com.br/ecoa/noticias/deutsche-welle/2025/07/09/o-impacto-para-o-clima-da-exploracao-de-petroleo-na-foz-do-amazonas.htm>
- Garlet, T. B., Savian, F. de S., Ribeiro, J. L. D., & Siluk, J. C. M. (2024). Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 553–570.
- Gauto, M. A., Carazolle, M. F., Rodrigues, M. E., Abreu, R. S., & Pereira, G. A. G. (2023). Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. *Energy for Sustainable Development*, 76, 101261.
- Gilio, L., Borges, P., Jank, M. S., & Ribeiro, P. H. C. (2024). **A bioenergia tropical na transição energética global**. BioComForest. <https://biocomforest.com.br/a-bioenergia-tropical-na-transicao-energetica-global/>
- Heffron, R. J. (2018). The application of distributive justice to energy taxation utilizing sovereign wealth funds. *Energy Policy*, 122, 649–654.
- Herculano, S. (2002). Riscos e desigualdade social: A temática da justiça ambiental e sua construção no Brasil. I **Encontro da ANPPAS**. [https://www.professores.uff.br/seleneherculano/wp-content/uploads/sites/149/2017/09/Riscos\\_\\_v4\\_e\\_desigualdade\\_social.pdf](https://www.professores.uff.br/seleneherculano/wp-content/uploads/sites/149/2017/09/Riscos__v4_e_desigualdade_social.pdf)
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2024). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – 3º Trimestre 2024**. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/17270-pnad-continua.html>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2025). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – Principais resultados, abril 2025**. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html>
- Instituto de Defesa do Consumidor (IDEC). (2024). **No escuro da floresta: Situação de exclusão energética na Amazônia Legal e lacunas nas políticas públicas de acesso à energia**. [https://idec.org.br/pdf/Iddec\\_Relatorio-Exclusao-Energetica-nos-SISOL.pdf](https://idec.org.br/pdf/Iddec_Relatorio-Exclusao-Energetica-nos-SISOL.pdf)
- International Energy Agency (IEA). (2024). **Global hydrogen review 2024**. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>

Instituto de Energia e Ambiente (IEMA). (2024). **4º inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas: Geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias**. [https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/12/4-inventario-ute-iema-2024\\_V4.pdf](https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/12/4-inventario-ute-iema-2024_V4.pdf)

Instituto de Estudos Socioeconômicos (INESC). (2024). **Monitoramento de subsídios às fontes fósseis e renováveis (7ª ed.)**. [https://inesc.org.br/wp-content/uploads/2024/10/estudo-7ed-subsidio-fosseis\\_renovaveis.pdf](https://inesc.org.br/wp-content/uploads/2024/10/estudo-7ed-subsidio-fosseis_renovaveis.pdf)

Instituto Internacional Arayara. (2024). **Regressão energética: Relatório**. <https://arayara.org/wp-content/uploads/2024/06/Relatorio-Coalizao-Energia-Limpa.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). **Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report**. Cambridge University Press.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). **Energy transition outlook 2025**. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>

Johansen, I. C., Reis, V., Mandai, S. S., & Moran, E. F. (2025). O impacto das hidrelétricas na Amazônia. **Ciência Hoje**, 417. <https://cienciahoje.org.br/artigo/o-impacto-das-hidreletricas-na-amazonia/>

Junk, W. J., & de Mello, J. A. S. N. (1990). Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. **Estudos Avançados**, 4(8).

Lazaro, L. L. B., & Soares, R. S. (2024). The energy quadrilemma challenges: Insights from the decentralized energy transition in Brazil. **Energy Research & Social Science**, 113, 103533.

Lima, D. T. (2022). **Usina hidrelétrica UHE no Brasil: Geração de energia e impactos ambientais** [Monografia de graduação, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira]. <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4997/1/DIMAS%20TEIXEIRA%20LIMA%20Mono.pdf>

Lozornio, E. J. C., & Simões, A. F. (2022). Social, environmental and economic externalities related to wind energy projects on the Isthmus of Tehuantepec. **Journal of Management and Sustainability**, 12(1), 169–187.

Mapa de Conflitos. (2025). *Injustiça ambiental e saúde no Brasil*. Fundação Oswaldo Cruz. <https://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/>

Mendes, E. D., Sampaio, R. J. S., & Collaço, F. M. de A. (2025). Justice or just plans? Reviewing the energy transition strategy of Brazil's Ceará state. **Energy Research & Social Science**, 119, 103865.

McKinsey. (2021). **Green hydrogen: An opportunity to create sustainable wealth in Brazil and the world**. <https://www.mckinsey.com/br/en/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>

Morante, J. R., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). **Hidrógeno – Vector energético de una economía descarbonizada**. Fundación Naturgy. [https://www.researchgate.net/publication/355477614\\_Hidrogeno\\_Vector\\_energetico\\_de\\_una\\_economia\\_descarbonizada](https://www.researchgate.net/publication/355477614_Hidrogeno_Vector_energetico_de_una_economia_descarbonizada)

Neves, F. N. C., & Dutra, L. E. D. (2025). **Nota técnica sobre o programa Renovabio e o mercado dos Cbios**. [https://andcbrasil.com.br/storage/2025/04/Nota\\_Tecnica\\_RenovabioCbio\\_FNCNeLEDD\\_assinado\\_28129\\_assinado.pdf](https://andcbrasil.com.br/storage/2025/04/Nota_Tecnica_RenovabioCbio_FNCNeLEDD_assinado_28129_assinado.pdf)  
Oxfam Brasil. (2021). **Pesquisa Nós e as desigualdades 2021**. <https://affemg.com.br/blog/pesquisa-nos-e-as-desigualdades-2021-oxfam-brasil>

Pavanelli, J. M. M., Soares, R. S., Siqueira, A. M., Collaço, F. M. de A., Lázaro, L. L. B., & Bermann, C. (2024). The context and evolution of distributed generation in the São Paulo Macrometropolis. In **Environmental governance of the São Paulo Macrometropolis: Perspectives on climate variability** (pp. 281–299). Springer.

Piacente, F. J., Silva, V. C., & de Armas, O. F. (2022). Evolução da produção agrícola canavieira na região noroeste do estado de São Paulo: Fases de expansão e crise no setor e seus impactos no uso da terra entre 2000 e 2013. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 60(1), e228194.

Relatório Luz – Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030. (2024). **VIII Relatório Luz**. Gestos – Soropositividade, Comunicação e Gênero. <https://gtagenda2030.org.br/relatorio-luz/relatorio-luz-2024/>

Stock, R., & Sovacool, B. (2024). Blinded by sunspots: Revealing the multidimensional and intersectional inequities of solar energy in India. *Global Environmental Change*, 84, 102796.

United Nations (UN). (2025). **The SDG report 2025**. Department of Economic and Social Affairs. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/>

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). (2023). **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970–2022)**. [https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/Relatorio-SEEG\\_gases-estufa\\_2023FINAL.pdf](https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/Relatorio-SEEG_gases-estufa_2023FINAL.pdf)

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). (2024). **Relatório analítico 12: Emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970–2023)**. Observatório do Clima. <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). (2025). **Danos nacionais**. <https://seeg.eco.br/dados/>

Traldi, M. (2018). Os impactos socioeconômicos e territoriais resultantes da implantação e operação de parques eólicos no semiárido brasileiro. *Scripta Nova: Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 22(589), 1–34.

Zhour, A. (2014). Mapping environmental inequalities in Brazil: mining, environmental conflicts and impasses of mediation.

## Como reduzir os impactos da energia em seu ciclo de vida?



# Cristiane Lima Cortez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Professora do Centro Universitário FAAP e Consultora em sustentabilidade da Fecomercio SP.

Todas as atividades humanas e produtivas requerem energia. Assim, sua produção e consumo estão entre os principais motores do desenvolvimento socioeconômico, mas também figuram como grandes fontes de pressão sobre o meio ambiente e a sociedade. Reduzir esses impactos é um dos grandes desafios da atualidade - talvez o maior - considerando o aquecimento global e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes do ciclo produtivo e de consumo de energia.

O ciclo de vida da energia abrange todas as fases envolvidas na geração, transporte, armazenamento e uso. Isso inclui desde a extração de petróleo, mineração de carvão e produção de biocombustíveis, até a fabricação de painéis solares, turbinas eólicas e baterias, além da infraestrutura de transporte, transmissão e distribuição. Seja qual for o tipo de energia, em cada uma dessas etapas, há riscos de emissão de GEE, degradação ambiental, uso intensivo de água e solo, além de impactos sobre comunidades locais e trabalhadores.

Reduzir os impactos desse ciclo exige uma abordagem integrada, baseada em três frentes principais: diversificação da matriz energética com fontes renováveis, aumento da eficiência energética e adoção de critérios socioambientais ao longo de toda a cadeia produtiva.

O Brasil já possui uma matriz elétrica de baixa emissão de GEE, em comparação a outros países - com forte presença de hidrelétricas, biomassa, solar e eólica. O grande desafio está nos combustíveis fósseis usados para a movimentação de cargas e pessoas num país de dimensão continental, que não fez uma opção por transportes eletrificados sobre trilhos.

Contudo, a oportunidade para os biocombustíveis líquidos (etanol, biodiesel, diesel verde, bioquerosene de aviação) e gasosos (biogás e biometano) substituírem diesel, gasolina, querosene de aviação e gás natural é real. É necessário fomentar as tecnologias avançadas de produção de biocombustíveis que vem sendo pesquisadas

e desenvolvidas há anos no território nacional, para que o País seja um exemplo de transição energética. Ainda, o uso de resíduos orgânicos como matéria-prima é uma excelente opção para resolver outro problema do país, o saneamento básico.

A transição energética brasileira deve priorizar tecnologias que combinem baixo carbono com responsabilidade socioambiental, podendo ser replicada em outros países com clima e condições de desenvolvimento econômico semelhantes, alavancando a bioeconomia, e a geração de riqueza.

Outro ponto de destaque é a riqueza do subsolo brasileiro, permitindo a mineração, por exemplo, de lítio, cobalto e outros minerais críticos para baterias e sistemas renováveis, a qual deve ser realizada com controle ambiental, transparência e participação das comunidades afetadas. O mesmo vale para o descarte de painéis solares, turbinas e baterias, que precisam ser incluídos em sistemas de logística reversa e reciclagem visando que os impactos no pós-consumo sejam também mitigados.

É fundamental ainda que a expansão das energias renováveis não reproduza desigualdades sociais. A geração distribuída, com painéis solares em residências de baixa renda, cooperativas de energia e comunidades quilombolas ou indígenas, constitui uma ferramenta poderosa de justiça energética, promovendo inclusão e autonomia.

Para que a transição energética seja realmente sustentável e regenerativa, é preciso garantir que todos os elos da cadeia estejam alinhados com critérios ambientais, sociais e de governança (ESG).

A transição energética brasileira deve priorizar tecnologias que combinem baixo carbono com responsabilidade socioambiental. Ainda, é possível investir em pesquisa e inovação para o desenvolvimento de novas fontes, como o hidrogênio verde, uma estratégia para setores difíceis de descarbonizar, como o transporte pesado e

a indústria de base e de fertilizantes – vital para um país agrícola.

A eficiência energética é um pilar estratégico, pois a melhor opção de energia ainda é aquela que não precisa ser gerada. Aperfeiçoar a eficiência no uso da energia na indústria, comércio, serviços e setor residencial, é uma forma eficaz de reduzir impactos sem comprometer o bem-estar. Isso inclui desde o uso de equipamentos mais eficientes, como geladeiras, motores e ar-condicionado, até o planejamento urbano que favoreça o transporte coletivo e a redução da demanda por deslocamentos motorizados.

No setor público, programas de eficiência energética em escolas, hospitais e edifícios governamentais podem gerar economia de recursos e inspirar o setor privado. A regulamentação e os incentivos fiscais para produtos e edificações sustentáveis também são ferramentas importantes.

Reduzir os impactos da energia em seu ciclo de vida é essencial para enfrentar as mudanças climáticas, preservar a biodiversidade e promover o desenvolvimento sustentável no Brasil. O país tem vantagens naturais e tecnológicas para liderar a transição energética, desde que integre inovação, inclusão social e respeito ao meio ambiente em sua política energética, que deve ser robusta, calcada na ciência e viabilidade técnico-econômica, que ofereça energia a um preço justo para todos os brasileiros e que seja implementada do início ao fim, não importando o governo que esteja liderando o País. O desafio é grande, mas os benefícios para as próximas gerações serão ainda maiores.

# Cristiane Moutinho Coelho<sup>1</sup> Elisângela Medeiros de Almeida<sup>2</sup> Glauce Maria Lieggio Botelho<sup>3</sup> Heloisa Borges Bastos Esteves<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Analista de Pesquisa Energética/EPE

<sup>2</sup>Superintendente de Meio Ambiente/EPE

<sup>3</sup>Superintendente Adjunta de Meio Ambiente/EPE

<sup>4</sup>Diretora de Petróleo, Gás e Biocombustíveis/EPE

O setor energético é essencial para o desenvolvimento econômico e social, mas sua expansão envolve inevitáveis impactos socioambientais. Reduzir tais impactos ao longo do ciclo de vida da energia — da extração de recursos naturais ao descomissionamento de infraestruturas — é um desafio central para governos, empresas e sociedade. Nesse contexto, o planejamento energético de longo prazo desempenha papel decisivo, pois permite antecipar riscos, orientar escolhas tecnológicas e alinhar investimentos com critérios de sustentabilidade.

O planejamento energético brasileiro envolve diferentes etapas e horizontes temporais, em que a segurança energética deve estar alinhada à sustentabilidade, considerando a variável socioambiental desde as fases iniciais até a execução dos projetos. Esse esforço é materializado em instrumentos de planejamento que conciliam segurança energética, equidade social e preservação ambiental. Dessa forma, a minimização de impactos na produção e exploração, geração, transporte e transmissão, consumo e descomissionamento é parte da equação do processo decisório, que busca compatibilizar a expansão da infraestrutura energética com a conservação ambiental e o desenvolvimento social.

Para a geração de energia hidrelétrica, por exemplo, a etapa inicial é marcada pelo estudo de inventário hidrelétrico, que define a divisão de quedas para uma bacia hidrográfica. A análise busca, por meio da comparação das alternativas, minimizar impactos socioambientais negativos e potencializar benefícios socioambientais. Ao

final do estudo, é realizada a Avaliação Ambiental Integrada (AAI), que examina os efeitos cumulativos e sinérgicos do conjunto de aproveitamentos previstos no inventário, permitindo uma visão estratégica da implantação das hidrelétricas na bacia.

Já no caso da transmissão de energia, os estudos iniciais envolvem a elaboração de relatórios que procuram evitar interferências em áreas protegidas e regiões com alta sensibilidade socioambiental, ao mesmo tempo em que se identifica possíveis restrições à implantação da linha de transmissão, e que influenciam diretamente em custos e prazos. Essa abordagem preventiva é essencial para reduzir riscos durante o licenciamento ambiental, principalmente durante a fase de construção.

Na exploração e produção de petróleo e gás natural, destaca-se o Estudo Ambiental de Área Sedimentar (EAAS). Esse estudo classifica as áreas como aptas, não aptas e em moratória, ou seja, avalia quais áreas são adequadas ou inadequadas para as atividades, além de oferecer recomendações ao licenciamento ambiental. Com essa abordagem, o EAAS contribui para a redução de conflitos locais e de riscos de investimento, além de desonerar o processo de licenciamento ambiental.

Por fim, nos estudos indicativos de gasodutos e oleodutos, a análise socioambiental orienta a definição de traçados referenciais. Novamente, evitam-se áreas protegidas e de alta sensibilidade, além do mapeamento de restrições socioambientais que possam afetar a viabilidade dos futuros projetos.

Esses instrumentos setoriais alimentam o Plano Nacional de Energia (PNE), que

orienta a estratégia de longo prazo, e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), que avalia as perspectivas de médio prazo. Ambos incorporam questões como mudanças climáticas, inclusão social, justiça energética e transição justa. O planejamento de longo prazo é, assim, a instância que conecta decisões setoriais ao objetivo maior de reduzir impactos ao longo de todo o ciclo de vida da matriz energética brasileira..

À medida que o planejamento avança para horizontes de curto prazo e projetos específicos, as análises socioambientais tornam-se mais detalhadas. No licenciamento ambiental a estratégia é garantir a implantação sustentável de projetos de geração de energia, linhas de transmissão e dutos, equilibrando as necessidades energéticas e econômicas com a proteção social e ambiental. Estudos de impacto ambiental aprofundam a avaliação de impactos propondo medidas que evitem, mitiguem ou compensem os impactos negativos. E no final da vida útil, ou seja, no descomissionamento da infraestrutura, a reciclagem e reutilização de componentes de painéis fotovoltaicos e pás de turbinas eólicas, por exemplo, são essenciais para evitar o acúmulo de resíduos e a necessidade de novas extrações de recursos.

O planejamento brasileiro também vem incorporando novas abordagens, como a metodologia para seleção de áreas destinadas à geração de energia eólica offshore, que considera critérios sociais e ambientais desde a etapa inicial. Tecnologias emergentes como captura e armazenamento de carbono (CCS), a análise da resiliência do sistema energético e a agenda de pobreza e justiça energética reforçam que reduzir impactos envolve não apenas mitigar danos ambientais, mas também garantir acesso democrático à energia no Brasil.

Mais do que uma exigência legal, a incorporação da dimensão socioambiental no ciclo de vida da energia é condição para garantir segurança, equidade e resiliência em um contexto de transição energética. O desafio do Brasil, nas próximas décadas, será continuar a aprimorar essas ferramentas, conciliando expansão do setor

com conservação ambiental e inclusão social, de modo a assegurar que a energia seja, cada vez mais, vetor de desenvolvimento sustentável.