

CEBRI



COPPE
UFRJ



PROGRAMA DE
**TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA**

FASE 2

Relatório Técnico



PROGRAMA DE
**TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA**

FASE 2

Relatório Técnico

Realização

CEBRI

BID

cenergia

COPPE
UFRJ

epe
Empresa de Pesquisa Energética

fipe
50 ANOS

MRTS
CONSULTORIA

Apoio

VEIRANO
ADVOGADOS

Patrocinadores

bp

edp

ENGIE

equinor

ExxonMobil

SIEMENS
energy

VIBRA

BNDES

**GOVERNO DO
BRASIL**
DO LADO DO POVO BRASILEIRO

Ficha Técnica

Coordenação editorial

Julia Dias Leite

Diretora Presidente do CEBRI

Rafaela Guedes

Senior Fellow do Programa de Transição Energética do CEBRI

Luciana Gama Muniz

Diretora Geral de Projetos do CEBRI

Léa Reichert

Diretora Adjunta de Projetos e Especialista em Energia do CEBRI

Laís Ramalho

Coordenadora de Projetos do CEBRI

Carlos J. Echevarría

Especialista Regional Líder em Energia, Divisão de Energia do BID

Martha Carvalho

Especialista Sênior de Energia do BID

Gustavo Naciff

Assessor da Presidência da EPE

Thiago Ivanoski

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais da EPE

Heloísa Borges

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis da EPE

Coordenação do Programa de Transição Energética do CEBRI

Clarissa Lins

Conselheira Consultiva Internacional e Chair do Programa de Transição Energética do CEBRI

Rafaela Guedes

Senior Fellow do Programa de Transição Energética do CEBRI

Guilherme Dantas

Pesquisador Sênior do Programa de Transição Energética do CEBRI

Gregório Cruz Araújo Maciel

Pesquisador Sênior do Programa de Transição Energética do CEBRI

Marcio Kahn

Pesquisador Sênior do Programa de Transição Energética do CEBRI

Instituições de pesquisa e equipe técnica do PTE2

Cenergia/COPPE (UFRJ): Fabio A. Diuana (coord.), Luiz Bernardo Baptista, Gerd Angelkorte, Taísa Nogueira Morais, André F. P. Lucena, Alexandre Szklo, Roberto Schaeffer.

FIPE (USP): Eduardo Amaral Haddad (coord.), Edson Paulo Domingues, Fernando Salgueiro Perobelli, Inácio Fernandes de Araújo.

MRTS Consultoria: Dorel Soares Ramos (coord.), Mateus Henrique Balan.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE): Gustavo Naciff (coord.), Thiago Ivanoski (coord.), Heloísa Borges (coord.), Thiago Barral, Aline Maria, Bruno Scola, Bruno Stukart, Roney Vitorino.

Pesquisadores e Redação

Bruna Targino

Pesquisadora Associada do CEBRI

Felipe Cristovam

Analista de Projetos do CEBRI

Gregório Cruz Araújo Maciel

Pesquisador Sênior do CEBRI

Guilherme Dantas

Pesquisador Sênior do CEBRI

José Ricardo Araujo

Estagiário de Projetos do CEBRI

Laís Ramalho

Coordenadora de Projetos do CEBRI

Léa Reichert

Diretora Adjunta de Projetos do CEBRI

Rafaela Guedes

Senior Fellow do CEBRI

Renata Oliveira

Coordenadora de Projetos do CEBRI

Thiago Moraes

Pesquisador Associado do CEBRI

Yuri Telles

Pesquisador Associado do CEBRI

Sumário

1. Sobre o PTE	6
-----------------------	----------

2. Cenários de Transição Energética	14
--	-----------

3. Impactos Sistêmicos	20
3.1. Matriz Energética	20
3.2. Emissões de GEE e CO ₂	24
3.3. Sensibilidade e a precificação de carbono	29
3.4. Agricultura, Floresta e Uso da terra e o nexso entre clima-biodiversidade	34
3.5. Transição energética justa e inclusão social	37

4. Roadmaps Setoriais	40
4.1. AFOLU	41
4.2. Indústria	48
4.3. Setor Energético	55
4.4. Transportes	64
4.5. Cidades (residências, comercial e público)	77

5. Impactos macroeconômicos, setoriais e regionais	83
---	-----------

6. Conclusão	99
---------------------	-----------

7. Metodologia	103
-----------------------	------------

8. Bibliografia	115
------------------------	------------



1

Sobre o PTE

O Programa BID–CEBRI–EPE de Transição Energética (PTE) tem o objetivo de identificar trajetórias viáveis para o Brasil alcançar a neutralidade de emissões de gases de efeito estufa até 2050. Em sua primeira fase (PTE 1), mapearam-se estratégias para o uso mais eficiente dos recursos energéticos, visando subsidiar a formulação de políticas públicas para a matriz energética brasileira de longo prazo.

A partir das recomendações e dos resultados do PTE 1, a segunda etapa do programa (PTE 2) foi concebida para atualizar e aprofundar as análises a fim de acelerar a transição energética brasileira. O PTE 2 tem como objetivo detalhar diretrizes, estratégias e ações em *roadmaps* setoriais – com ênfase no período de 2025 a 2050 – esclarecendo os avanços necessários em políticas públicas e regulação para viabilizar as trajetórias rumo à neutralidade de emissões no país. Durante a elaboração do PTE 1, identificaram-se duas lacunas principais que o PTE 2 busca endereçar:

-
- 1. Viabilidade setorial e tecnológica:** verificou-se a necessidade de detalhar as perspectivas de cada setor e suas rotas tecnológicas, olhando pelo lado do consumo e avaliando a viabilidade prática de certas estratégias. Por exemplo, tornou-se evidente a importância de avaliar a expansão do setor elétrico brasileiro – incluindo simulações do balanço oferta-demanda de energia e potência do sistema de geração centralizada – para verificar se a expansão planejada de fontes renováveis, predominantemente solar e eólica, indicaria necessidades sistêmicas de tecnologias para a complementação de capacidade, além de possíveis expansões de intercâmbios inter-regionais.
-
- 2. Análise macroeconômica dos cenários:** faz-se crucial incorporar análises que quantifiquem os impactos das diferentes trajetórias na economia brasileira, em termos de investimentos, PIB, geração de empregos, renda e inflação. Ao integrar os efeitos socioeconômicos, os formuladores de políticas passam a dispor de dados mais abrangentes (físicos e financeiros), o que permite definir metas claras, priorizar iniciativas e adotar políticas públicas mais assertivas para uma transição energética sustentável.

Em resposta a essas necessidades, o PTE 2 atualiza os cenários energéticos desenvolvidos na etapa anterior: Transição Brasil, Transição Global e Transição Alternativa, incorporando mudanças de contexto recentes (como dinâmicas geopolíticas e tecnológicas atuais) e aprimorando as ferramentas de análise. Além da atualização dos cenários, o PTE 2 desenvolve *roadmaps* setoriais com impactos macroeconômicos quantificados, indicando os avanços requeridos no âmbito institucional, regulatório e de políticas públicas para que o Brasil não apenas alcance a neutralidade de emissões em 2050, mas também se consolide como um provedor global de soluções energéticas limpas no horizonte 2025–2050.

Dentro desse contexto, o PTE 2 mostra que a matriz energética brasileira permanece amplamente renovável em todos os cenários, com expansão consistente de fontes eólica, solar e bioenergia – elevando a participação das renováveis para quase 80% em 2050 nos cenários de maior ambição. A trajetória de emissões de gases de efeito estufa (GEE) atingem a neutralidade de emissões até 2050 em todos os cenários avaliados, embora isso ocorra por caminhos distintos quanto ao ritmo e ao potencial de contribuição de cada setor para a descarbonização. O setor de Agricultura, Florestas e Mudanças de Uso do Solo (AFOLU) desempenha papel decisivo nesse resultado, combinando o fim do desmatamento ilegal até 2030, restauração de 12 milhões de hectares até 2035, recuperação de pastagens e práticas alinhadas ao Plano

ABC+. No setor elétrico, os cenários convergem para um sistema quase totalmente renovável até 2050, com predominância de eólica e solar. Contudo, os resultados da modelagem apontam riscos de déficit de potência, exigindo sistemas de armazenamento de energia, como baterias e usinas hidrelétricas reversíveis, além de fortalecer mecanismos de resposta da demanda.

O setor de transportes adota uma combinação de biocombustíveis, complementada pela eletrificação, com ganhos expressivos de eficiência. Já a indústria deve passar por transformações notáveis: uso ampliado de biomassa e eletricidade, além de tecnologias de captura de carbono e políticas industriais verdes para evitar perda de competitividade internacional – especialmente em setores carbono intensivos como cimento, aço e química. As cidades apresentam forte crescimento da demanda energética, porém, acompanhada de substituição quase integral de combustíveis fósseis por eletricidade renovável e biocombustíveis. Em termos macroeconômicos, a transição energética tem potencial de acelerar o crescimento do PIB para patamares superiores à média histórica dos últimos anos¹, alcançando taxas que variam aproximadamente entre 2,8% e 3,2% a.a, além de gerar cerca de 1 milhão de empregos por ano até 2050. Porém, os cenários indicam que, sem políticas coordenadas, desigualdades regionais persistentes podem limitar a distribuição equilibrada dos benefícios econômicos e sociais – comprometendo os esforços para promover uma transição energética justa.

Em síntese, os resultados do PTE 2 reforçam que o Brasil dispõe de condições favoráveis para avançar de forma consistente rumo à neutralidade de emissões, desde que aprofunde a coordenação entre setores, estimule a cooperação público-privado, fortaleça instrumentos regulatórios e amplie a atração de investimentos capazes de gerar competitividade. Os achados apresentados até aqui oferecem uma visão geral dos principais desafios e oportunidades identificados pelo programa. Nas próximas páginas, esses resultados serão detalhados de forma estruturada, apresentando análises por meio de *roadmaps* setoriais (AFOLU, indústria, energia, transportes e cidades) e implicações macroeconômicas para orientar o planejamento energético de longo prazo no país.

1. Essa média histórica nos últimos 28 anos é de 2,3% a.a., de acordo com o Sistema de Contas Nacionais (SCN) do IBGE.

Processo de construção do estudo

Este relatório é resultado de um processo colaborativo e interativo liderado pelo CE-BRI, que apresenta os cenários modelados e seus resultados, bem como propostas de ações e políticas públicas concretas para a transição energética brasileira. O PTE2 contou com a participação técnica especializada da Coppe/UFRJ, FIPE/USP, MRTS e EPE, além do apoio estratégico do BID e do BNDES. Cada parceiro desempenhou um papel complementar no desenvolvimento do estudo:

O **Laboratório Cenergia (Coppe/UFRJ)** foi responsável pela atualização e expansão dos cenários energéticos do PTE 1, utilizando modelos de avaliação integrada de oferta e demanda de energia e de uso do solo (BLUES – Brazilian Land-Use and Energy Systems Model), além de incorporar premissas climáticas, restrições tecnológicas e políticas setoriais. A Coppe fornece os dados de consumo e oferta energética detalhados por setor e região, além de projeções de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e uso do solo até 2050.

A **Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas – FIPE/USP** integrou os resultados setoriais e regionais fornecidos pela Coppe em seus modelos de equilíbrio geral computável e matriz insumo-produto, gerando as projeções macroeconômicas agregadas e desagregadas (PIB, emprego, investimentos, comércio exterior e renda), bem como os impactos regionais da transição energética para o Brasil. A FIPE também realiza ajustes interativos para garantir a consistência entre as projeções energéticas e as restrições econômicas dos cenários.

A **MRTS Consultoria** utiliza os dados da Coppe para testar a viabilidade técnica da expansão elétrica em cada cenário. A MRTS avalia a segurança do suprimento de energia por meio de simulações detalhadas do sistema elétrico (análises de balanço de potência, LOLP, CVAR², e necessidade de capacidade firme), identificando gargalos e restrições operacionais para o atendimento às necessidades projetadas de energia e potência.

Essas instituições, com a participação ativa da EPE, trabalharam de forma integrada e interativa, ajustando seus modelos com base nas interações cruzadas. Premissas de demanda e oferta de energia da Coppe alimentam os modelos macroeconômicos da FIPE, além de serem insumos para a MRTS avaliar a adequabilidade do suprimento do sistema elétrico. A EPE contribuiu nesse processo como instância de diálogo

2. LOLP (Loss of Load Probability) refere-se à probabilidade de ocorrência de perda de carga. CVaR (Conditioned Value at Risk), ou Valor Condicional em Risco, avalia a probabilidade de déficits e sua magnitude.

técnico, apoiando a harmonização das premissas e a leitura integrada dos resultados à luz do planejamento energético nacional. As equipes compartilharam dados, ajustaram premissas em reuniões técnicas conjuntas e buscaram a consistência global dos cenários.

Ao CEBRI coube o papel de coordenar e integrar os insumos técnicos fornecidos pelas instituições, desenvolvendo os *roadmaps* setoriais que são apresentados neste relatório. Esses *roadmaps* são produtos de autoria do CEBRI, construídos com base nos resultados gerados pelos modelos quantitativos das instituições citadas, e incorporam análises qualitativas adicionais conduzidas pelo CEBRI, baseadas em tendências internacionais de descarbonização, avanços tecnológicos esperados e contexto político-institucional brasileiro.

Nesse processo, reuniões técnicas entre CEBRI, Coppe e EPE estabeleceram e validaram as premissas consideradas nos cenários. Em seguida, os modelos quantitativos foram executados pela Coppe, FIPE e MRTS. Os resultados gerados pelas instituições técnicas foram então analisados pelo CEBRI, que utilizou esses dados como base para elaborar uma primeira versão dos *roadmaps* setoriais.

Os *roadmaps* setoriais, embora consistentes com os cenários quantitativos, não são projeções diretas dos modelos. São uma síntese analítica elaborada pelo CEBRI, ou seja, inferências e recomendações extraídas a partir dos resultados de modelagem em conjunto com o contexto institucional. Assim, os cenários quantificados fornecem a base factual, enquanto os *roadmaps* traduzem esses insumos técnicos em estratégias e ações concretas.

Na etapa seguinte, o CEBRI promoveu reuniões setoriais restritas com especialistas externos e *stakeholders* relevantes dos setores analisados, discutindo narrativas, refinando propostas e garantindo a aderência das recomendações às realidades específicas dos segmentos abordados. Por fim, incorporando os resultados dessas reuniões setoriais e validando-os novamente com os parceiros técnicos, o CEBRI consolidou dois documentos finais, um relatório executivo e o presente relatório técnico, com recomendações estratégicas claras e exequíveis.

Contexto global e nacional da transição energética

A trajetória da transição energética é marcada por profundas transformações nos sistemas de energia, impulsionadas por avanços tecnológicos, compromissos climáticos, mudanças regulatórias e evolução dos padrões de consumo. A busca por solu-

ções de baixo carbono ganhou destaque na agenda global como resposta ao desafio das mudanças climáticas e aos compromissos internacionais firmados no âmbito do Acordo de Paris. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a limitação do aumento da temperatura média global a 1,5°C exige a redução de emissões de GEE em aproximadamente 45% até 2030 (em relação aos níveis de 2010) e a neutralidade climática até 2050.

Esses objetivos têm sido acompanhados de ação. Segundo a OCDE, 113 países, cobrindo cerca de 88% das emissões globais, adotaram metas de neutralidade de emissões (96 deles têm essa meta até 2050)³. Compromissos firmados a nível multilateral, como os de triplicar a capacidade de energias renováveis para, no mínimo 13 terawatts (TW) e dobrar a eficiência energética de 2% para 4% até 2030 assumidos em Dubai na COP28, contribuíram para definir um rumo nas tendências globais de transição energética. Esses se traduzem parcialmente na prática, com a expansão das energias renováveis e a crescente eletrificação dos transportes em particular. Em 2024, segundo a International Energy Agency (IEA)⁴, a expansão da geração de energia renovável bateu recordes e atendeu a mais de 70% do aumento da demanda por eletricidade, que foi particularmente expressivo (4,3%, contra 2,5% em 2023). As vendas de carros elétricos continuaram a crescer, aumentando mais de 25%, para mais de 17 milhões de unidades (contra menos de 14 milhões em 2023). As vendas de veículos elétricos representaram mais de 20% de todas as vendas de carros. Segundo a Agência, a rápida adoção de tecnologias de energia limpa limita o crescimento das emissões – evitando 2,6 bilhões de toneladas adicionais de CO₂ por ano. Para além dos renováveis e da eletrificação, outras rotas de descarbonização vêm ganhando centralidade no debate, incluindo as tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), os sistemas de bioenergia com captura de carbono (BECCS) e o hidrogênio de baixo carbono, porém, com resultados mais incipientes.

Por outro lado, os mesmos estudos mostram que as emissões de CO₂ continuaram crescendo em 2024, bem como a demanda por todas as fontes energéticas, incluindo os fósseis. As emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) do setor energético atingiram um novo recorde histórico, assim como a temperatura média no ano, que ultrapassou os 1,5°C. A revisão dos compromissos climáticos realizada em novembro de 2025 pelo PNUMA⁵ mostrou que as projeções de aquecimento global para este século estão entre 2,3 °C e 2,5 °C com base na implementação integral das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), enquanto aquelas baseadas

3. <https://www.oecd.org/en/data/dashboards/climate-action-dashboard.html>. Os dados foram atualizados em agosto de 2025.

4. Global Energy Review 2025, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/> e World Energy Outlook 2025 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025/>

5. Programa da ONU para o Meio Ambiente, Emissions Gap Report 2025: Off Target. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2025>

nas políticas atuais chegam a 2,8 °C. Para além dos níveis variados de ambição nas NDCs, a OCDE também mostra no estudo citado acima que a maior parte das metas não são juridicamente vinculantes, com apenas 31 países – 18% das emissões globais – tendo incorporados essas metas em legislação.

Há, ainda, diversas lacunas entre essas ambições e a implementação efetiva da transição. Muitas soluções de baixo carbono ainda enfrentam barreiras para implantação ou escalonamento – incluindo limitações técnicas e de infraestrutura, falta de financiamento acessível, ausência de sinais ou marcos regulatórios de longo prazo ou de contratos de offtake confiáveis e competitividade econômica limitada em comparação com alternativas de altas emissões. O financiamento é uma questão central nesse contexto. A expansão das fontes renováveis exige investimentos substanciais em redes elétricas, armazenamento e flexibilidade do sistema. Embora investimentos globais em tecnologias de transição energética estejam em expansão – alcançando USD 2,4 trilhões em 2024, um aumento de 22% em relação aos níveis de 2022 e 2023 – esse montante permanece insuficiente para alinhar o setor energético ao cenário de 1,5°C, segundo a Climate Policy Initiative (CPI). A lacuna de financiamento é especialmente evidente em áreas como eficiência energética, bombas de calor, hidrogênio de baixo carbono e tecnologias de CCS, nas quais os investimentos precisariam mais do que quadruplicar para atender às metas de descarbonização e garantir a possibilidade de uma transição inclusiva.⁶

A questão do financiamento tem sido um importante tópico de discussões em fóruns multilaterais como as COPs. O plano de ação para atingir a meta de mobilização de pelo menos US\$ 1,3 trilhão por ano até 2035 em financiamento climático destinado a países em desenvolvimento – tanto para mitigação quanto para adaptação às mudanças climáticas – foi detalhado no *Baku to Belém Roadmap*,⁷ sem entrar na agenda oficial da COP30. Outro ponto crucial nas negociações tem sido os termos da transição para longe dos combustíveis fósseis. Se houve na COP28 um reconhecimento formal de que combustíveis fósseis são a causa principal do aquecimento global, as modalidades e o ritmo dessa transição ainda precisam ser definidos. O mapa do caminho para a transição para longe dos fósseis não entrou na declaração final da COP30, mas o seu desenho ficou da responsabilidade da Presidência brasileira.

Nesse contexto global, o papel do Brasil se destaca na transição energética. A matriz elétrica brasileira já é predominantemente renovável, ao mesmo tempo em que a produção de petróleo e gás natural segue como um pilar importante da economia do

6. O relatório completo se encontra disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2025/11/Global-Landscape-of-Energy-Transition-Finance-2025.pdf>

7. <https://unfccc.int/topics/climate-finance/workstreams/baku-to-belem-roadmap-to-13t>

país e parte fundamental do suprimento energético interno. Enquanto isso, o perfil de emissões brasileiras não é majoritariamente relacionado ao uso e consumo de energia como na maior parte do mundo, mas sim às mudanças no uso da terra (desmatamento) e à agropecuária, que, juntas, representam cerca de 70% das emissões totais no país (EPE, 2025). Isso significa que as estratégias nacionais de descarbonização precisam articular políticas energéticas, ambientais e agrícolas de forma integrada.

É nesse cenário que se insere o PTE 2, concebido como um esforço colaborativo para apoiar a formulação de políticas públicas e estratégias de longo prazo para a transição energética no Brasil, considerando como o país se integra nas tendências globais e a sua contribuição para frear o aumento da temperatura média global. Os compromissos assumidos pelo país por meio de sua NDC, submetida no âmbito do Acordo de Paris, implicam desafios e oportunidades que demandam a definição de estratégias coordenadas entre governo, setor produtivo e sociedade civil.

A transição energética é um processo complexo, que envolve múltiplas dimensões e requer soluções integradas e pragmáticas. O PTE 2 busca contribuir para esse debate, fornecendo análises técnicas e recomendações estratégicas que possam subsidiar decisões informadas e fundamentadas, respeitando a diversidade de perspectivas e as prioridades nacionais.

Nas próximas páginas, será possível verificar os muitos caminhos viáveis que o Brasil pode construir para alcançar a neutralidade climática em 2050, aliando crescimento econômico, inovação tecnológica, criação de empregos, redução de desigualdades regionais e inclusão social. Contudo, para que isso seja possível, é preciso superar gargalos importantes e investir em parcerias e cooperação para unir governos, setor privado, academia e sociedade civil. Desse modo, será possível posicionar o Brasil como líder em soluções para descarbonização na nova economia global.



2

Cenários de Transição Energética

Esta seção apresenta os cenários exploratórios elaborados no PTE 2, que servem de base para as análises e recomendações do estudo. Foram utilizados três cenários contrastantes para avaliar diferentes contextos e desafios na trajetória de descarbonização do Brasil até 2050.

A **neutralidade das emissões** – entendida como o equilíbrio entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e as remoções ou compensações correspondentes – é o eixo central desses cenários. Alcançar essa neutralidade em meados deste século é fundamental para cumprir o Acordo de Paris e limitar os impactos das mudanças climáticas.

Nesse contexto, o Brasil precisa traçar suas próprias rotas de transição, compatíveis com suas metas de redução de emissões e com suas peculiaridades energéticas, econômicas e sociais, garantindo que a neutralidade de emissões seja alcançada de forma custo-efetiva e sustentável.

A seguir, são detalhados os três cenários considerados, incluindo seus critérios de construção, principais premissas e implicações para a estratégia energética brasileira.

Cenário Transição Brasil (TB)

Trata-se do cenário base do estudo, no qual o Brasil cumpre integralmente suas metas climáticas atuais, buscando a trajetória ótima em termos de custo para atingir a neutralidade de emissões de GEE em 2050. Para isso, busca-se identificar como o país pode atingir suas metas climáticas com custo ótimo, aproveitando seu potencial de energias limpas e outras vantagens comparativas.

As premissas climáticas centrais desse cenário incluem a redução de aproximadamente 50% das emissões de GEE até 2030 em relação aos níveis de 2005, bem como alcançar a neutralidade de emissões até 2050, em linha com a NDC. Adicionalmente, assume-se o cumprimento das metas de uso da terra associadas à NDC brasileira, notadamente o desmatamento ilegal zero a partir de 2030 e programas de reflorestamento e recuperação florestal (cerca de 12 milhões de hectares até 2035, alinhado às premissas dos cenários) para ampliar remoções de carbono.

Cenário Transição Alternativa (TA)

No Cenário Transição Alternativa (TA) explora-se um caminho distinto para o Brasil atingir a neutralidade de emissões em 2050, introduzindo outras trajetórias tecnológicas, climáticas e de políticas públicas que podem impactar o ritmo e as escolhas da transição. Trata-se de uma variação do cenário base TB – mantendo as metas climáticas de 2030, 2035 e 2050 – porém, com condições que limitam ou induzem certas rotas tecnológicas pelas quais a transição energética poderá se desdobrar.

Em essência, o cenário TA funciona como um “teste de estresse”: simula como o Brasil poderia alcançar a neutralidade em um contexto menos favorável ou mais rígido, seja por impactos diretos das mudanças do clima, por atrasos na difusão de tecnologias ou por decisões políticas que diferem do caminho de otimização de custos indicado pela modelagem integrada.

Para tanto, é introduzido um conjunto de premissas adicionais que simulam um ambiente distinto do cenário TB para a descarbonização do Brasil até 2050:

- No **setor elétrico**, considera-se a redução do potencial de geração hidrelétrica em função da diminuição do fator de capacidade da tecnologia por efeito das mudanças climáticas, o aumento da demanda de eletricidade (cerca de 7% acima do cenário de referência); a limitação inicial da expansão eólica no início do horizonte do estudo; além de uma expansão nuclear mais acelerada.

- Em **biocombustíveis**, pressupõe-se a plena implementação das políticas já existentes, garantindo elevados níveis de mistura e a introdução crescente de diesel verde, Combustível Sustentável de Aviação (SAF) e biometano, independentemente do custo de curto prazo.
- Adoção de uma **precificação de carbono**, simulando o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), o que antecipa a queda do consumo doméstico de fósseis.
- No **transporte**, prevê-se a substituição total do Querosene de Aviação (QAV) fóssil por SAF e do *bunker* marítimo por biocombustíveis até 2050, além de forte eletrificação e mudança modal em favor de modais menos emissores.
- Suposição de que o Brasil se posiciona como ator relevante na economia do **hidrogênio** de baixo carbono, alcançando cerca de 4,2 milhões de toneladas/ano em 2050 (com 38% destinadas à exportação), inclusive com rotas de produção a partir de biomassa e de eletrólise (2 milhões de toneladas/ano de H2V).

Cenário Transição Global (TG)

O Cenário Transição Global (TG) é formulado com base num exercício global de custo-ótimo, ilustrando o papel do Brasil em um mundo que busca limitar o aumento da temperatura em um 1,5°C. Nesse cenário hipotético, assume-se que o Brasil acaba submetido a um orçamento de carbono extremamente restritivo – ou seja, uma cota máxima de emissões de CO₂ muito menor do que aquela implícita na sua NDC atual. Esse cenário de contraste ilustra uma situação em que o mundo não colabora suficientemente para a transição energética em termos de políticas efetivas ou distribuição equitativa de esforços. Com base em modelos de avaliação integrada globais (como o modelo COFFEE do Cenergia/Coppe/UFRJ), estimou-se um orçamento cumulativo de apenas ~7,24 Gt de CO₂ para o Brasil entre 2010 e 2050. Essa limitação significa que, no cenário TG, o país precisaria implementar reduções de emissões ainda mais profundas e aceleradas do que no cenário TB para se manter dentro de sua parcela de emissões compatível com a trajetória global de 1,5°C.

Quadro 1. Comparação dos cenários

	TB Transição Brasil	TA Transição Alternativa	TG Transição Global
População	Crescimento médio de 0,2% a.a. entre 2020-2050		
AFOLU	Desmatamento ilegal zero a partir de 2030 Plano ABC+ PLANAVEG com atraso de 5 anos Reflorestamento anual máximo igual a 1.2 Mha/ano (floresta+savana)		
Meta de emissões	Metas estabelecidas na NDC para 2025, 2030 e 2035		NA
Neutralidade climática	Neutralidade de emissões de GEE em 2050		NA
Orçamento de carbono	Implícito para cumprir a NDC nacional		~7,24 Gt CO ₂ (2010–2050) – alocação custo ótimo global
Metas IMO⁸	NA	Inclusas	Inclusas
Metas ICAO⁹	NA	Inclusas	Inclusas
Sector Elétrico	Decreto 11.042 da Lei 14.182 de 2021 Entrada de Angra 3 em 2030	Aumento da demanda elétrica em 7%; redução do FC ¹⁰ das UHEs	Decreto 11.042 da Lei 14.182 de 2021 Entrada de Angra 3 em 2030
Combustível	Diesel B15 a partir de 2025 Gasolina com 27,5%v. etoh Expansão RNEST (230kbpd em 2030)	Gasolina C: 35% etanol em 2050 Diesel B: 25% em 2050 Ao menos 3% de diesel verde (HVO) ao diesel B Limite de 50% de biometano na rede de gás natural em 2050	Diesel B15 a partir de 2025 Gasolina com 27,5%v. etoh Expansão RNEST (230kbpd em 2030)
Hidrogênio de baixo carbono	Desenvolvimento conforme viabilidade (sem meta específica)	~4,2 Mt produzidos em 2050 (38% para exportação; 10% via biomassa; ~2Mt via eletrólise)	Desenvolvimento conforme viabilidade (sem meta específica)
Transporte	Melhoria da pavimentação de estradas	Variação percentual da participação de cada modal	Melhoria da pavimentação de estradas
Precificação de Carbono	NA	Conforme Cenário APS (Announced Pledges Scenario) da IEA	NA

8. IMO (International Maritime Organization): agência da ONU responsável por normas internacionais de navegação e transporte marítimo.

9. ICAO (International Civil Aviation Organization): agência da ONU que regula a aviação civil internacional.

10. FC (Fator de Capacidade): indicador que relaciona a geração efetiva de uma usina ao longo de um período com a sua geração máxima possível, caso operasse continuamente em plena carga.

Principais Resultados

Os resultados do PTE2 demonstram que o Brasil dispõe de múltiplos caminhos factíveis para alcançar a neutralidade climática em 2050, conciliando crescimento econômico, segurança energética e redução de emissões. Em todos os cenários avaliados, se demonstrou como é possível a premissa de atingimento das metas de curto prazo (redução de 50% das emissões até 2030 em relação a 2005) e de atingir a neutralidade de emissões no meio do século. No entanto, esse percurso requer ações imediatas por parte do governo, bem como forte coordenação entre atores públicos e privados na busca por tornar o Brasil um país cada vez mais competitivo e atrativo para investimentos privados.

Em termos estruturais, todos os cenários apontam para uma profunda transformação da matriz energética, com participação crescente de renováveis (eólica, solar, biomassa) e papel complementar de nuclear, hidrogênio e tecnologias de armazenamento, avanço da bioenergia reduzindo o espaço dos combustíveis fósseis, em ritmos e intensidade distintos em cada cenário. Do lado das emissões, destaca-se o papel decisivo do setor de uso da terra, que se converte em sumidouro líquido de carbono, compensando emissões residuais.

Do ponto de vista macroeconômico, a transição energética é compatível com crescimento econômico, promovendo expansão adicional do PIB e a geração líquida de 1,5 a 2 milhões de empregos até 2050. Entretanto, os dados revelam que as desigualdades regionais persistem: o Nordeste, por exemplo, aparece como uma das regiões com maior potencial de atração de investimentos em renováveis, mas ao mesmo tempo continua a enfrentar desafios sociais mais agudos, o que reforça a necessidade de uma política industrial com recortes regionais.

Outro resultado relevante é que o cenário que inclui precificação de carbono é aquele que apresenta maior crescimento econômico. Isso ocorre pois o preço de carbono estimula inovação e viabiliza rotas tecnológicas cruciais para a neutralidade, como CCUS, BECCS, SAF, biobunker e HVO. Esses resultados reforçam a criticidade do fomento à inovação e parcerias público-privadas para o sucesso da transição.

Em conjunto, essas mudanças reposicionam o Brasil como líder potencial em energia limpa, bioeconomia e soluções climáticas, criando oportunidades de desenvolvimento regional, inovação tecnológica e geração de empregos verdes. É importante, contudo, reconhecer as limitações do estudo: o PTE2 não incorporou a quantificação dos custos da inovação por meio da análise dos riscos climáticos e

seus impactos sobre setores produtivos, nem a avaliação detalhada de medidas de adaptação. Esses aspectos permanecem como agenda fundamental para próximos trabalhos, de modo a fornecer um quadro mais completo sobre os riscos e as oportunidades associados à transição energética.

Quadro 2. Comparativo dos principais resultados entre os cenários

	TB Transição Brasil	TA Transição Alternativa	TG Transição Global
Emissões acumuladas 2010–2050 (GtCO₂)	~11	~10	7,24
Ano da neutralidade climática	2050	2050	~2045
Emissões líquidas em 2050 (MtCO₂eq/ano)	≈ 0	≈ 0	-163
% renovável da matriz energética em 2050	60%	72%	78%
Crescimento acumulado do PIB (%) (2025-2050)	109%	124%	95%
Geração acumulada de empregos (2025-2050)	24 milhões	28 milhões	22 milhões
Viabilidade	●●●●○ Alta	●●●○○○ Média	●○○○○○ Baixa
Principais condicionantes			
Governança	Cumprimento das NDC, promoção de estabilidade regulatória	Implementação de precificação de carbono e da Lei do Combustível do Futuro	Coordenação global (difícil no cenário geopolítico atual)
Tecnologia	Renováveis integradas com armazenamento e resp. da demanda, além da expansão da transmissão	Premissas de penetração de armazenamento e eletromobilidade compatíveis com PDE ¹¹	BECCS em larga escala, antecipar baterias, resposta da demanda e térmicas CCS
Economia	Eficiência energética e eletrificação difusa (indústria, edifícios, transportes leves)	Reajuste de preços relativos via precificação de carbono e política industrial para novas cadeias verdes	Pressão sobre uso da terra: bioenergia deslocando fortemente o agro
Riscos a serem mitigados	Dependência alta de AFOLU (precisa de <i>enforcement</i> em desmatamento)	Perda de competitividade e maior custo tarifário	Impacto na balança comercial, com a queda acelerada no agro e petróleo

11. Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 da EPE

3

Impactos Sistêmicos

3.1. Matriz Energética

Principais achados quantitativos

Demanda total de energia cresce moderadamente até 2050, alcançando cerca de 410 Mtep (TB), 399 Mtep (TA) e 373 Mtep (TG), com menor expansão no cenário mais ambicioso (TG) devido a fatores como o aumento da eletrificação no transporte, ganhos de eficiência e maior redução na dependência de fósseis.

Fontes renováveis ganham peso em todos os cenários, com destaque para o crescimento de biomassa, eólica e solar, aumentando de 37% em 2025 para cerca de ~50% (TB), ~63% (TA) e ~67%+ (TG) da energia primária em 2050.

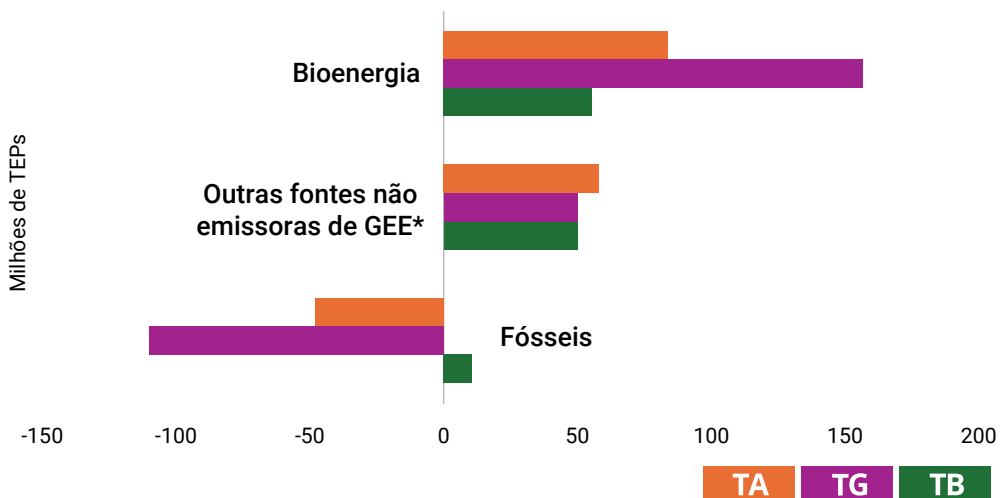
Fósseis perdem participação, mas não desaparecem: petróleo e gás natural ainda representando ~35% (TB), ~24% (TA) e ~18% (TG) da matriz em 2050, indicando papel complementar na transição.

A nível global, a matriz energética continua composta predominantemente por energias fósseis, com renováveis representando em torno de 15% da oferta energética (EPE, 2025). Segundo a IEA (2023), petróleo e derivados, gás natural e carvão respondam por 80,7% da energia fornecida globalmente. Já as demais fontes – como nuclear, solar, eólica, hidrelétrica, biocombustíveis e outros renováveis – representam apenas 19,3% do total. Dentro desse conjunto, mais de 50% do consumo de renováveis ocorreu no setor residencial, seguido por participações relevantes nos setores industrial (28,2%) e de transportes (11,7%).

Nesse contexto, o Brasil se destaca pela participação significativa de fontes renováveis na sua oferta primária de energia (50% do total), bem acima da média global. O país é o terceiro maior gerador de energia elétrica renovável no mundo, bem como o 8º produtor de petróleo.

Os cenários de neutralidade de emissões apontam para uma dinâmica energética que ampliará ainda mais a participação das fontes renováveis na matriz energética do país. Conforme pode ser visto no gráfico 1, em todos os cenários, o incremento de demanda por energia será suprido (quase) exclusivamente por fontes renováveis e bioenergia, em contraste com o período de 1990-2020, onde esse suprimento foi dividido entre fontes fósseis e renováveis. Isso será essencial para a descarbonização dos setores finais de consumo, especialmente transportes e indústria, que representam cerca de 65% do consumo energético no Brasil (EPE, 2025).

Gráfico 1. **Energia Primária - Variação Acumulada (2020-2050)**



* fontes para geração elétrica que não geram emissões diretas (hidrelétrica, solar, eólica e nuclear).

A bioenergia, em particular, é a fonte que mais ganha participação em 2050 e impulsiona a descarbonização desses setores, sobretudo nos segmentos de difícil abatimento – por exemplo, favorecendo a substituição de diesel no transporte de longo curso, bunker de navegação e querosene de aviação. Trata-se também de um instrumento de alcance de emissões negativas, com as tecnologias BECCS, *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*. Os capítulos sobre Transporte e Biocombustíveis detalham essa contribuição.

Os cenários do PTE2 confirmam que a matriz energética brasileira pode se tornar mais limpa e diversificada, consolidando a posição do país como líder em fontes renováveis. A oferta primária se expande, refletindo o crescimento da economia e o aumento populacional, assim como a necessidade de proporcionar um melhor bem-estar médio para a sociedade brasileira. Premissas de crescimento econômico (variando entre 2,8% e 3,2 ao ano, dependendo do cenário) e expansão populacional (para aproximadamente 225 milhões de pessoas ao longo da década de 2040), bem como de maior acesso à energia são comuns a todos os cenários. Contudo, os cenários apresentam ritmos distintos de expansão do consumo energético, refletindo o aproveitamento de ganhos de eficiência energética.

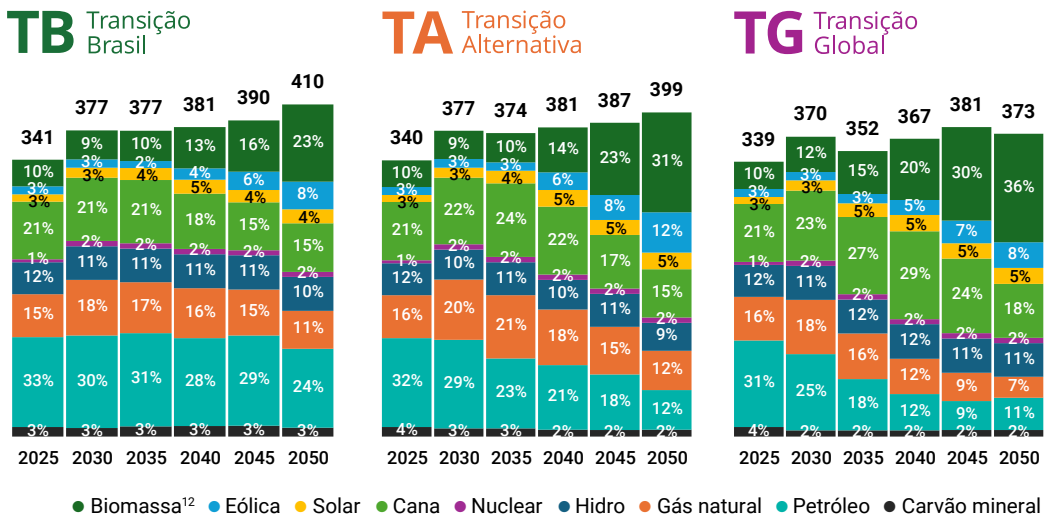
No cenário Transição Brasil (TB), a oferta primária de energia por fontes renováveis cresce de cerca de 50% em 2025 para aproximadamente 60% em 2050. A oferta total de energia alcança um patamar de 410 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) até 2050, o que representa um crescimento anual médio de 1,2% ao ano – metade do ritmo observado nos últimos trinta anos. A expansão é movida principalmente pela bioenergia e pelas fontes solar e eólica, que juntas suprem quase toda a expansão futura da demanda. O petróleo e o gás mantêm alguma relevância, embora a participação do petróleo diminua de cerca de 34% da matriz atual para cerca de 25% em 2050. O carvão permanece na matriz energética, de forma residual, devido ao seu uso industrial, especialmente nas indústrias siderúrgica e metalúrgica.

Já no Cenário TA, que simula um ambiente com condicionantes distintas do cenário TB, as renováveis atingem 72% da matriz em 2050, resultado da maior penetração de biocombustíveis – e apesar dos limites à expansão da eólica. O petróleo e o gás recuam de forma semelhante ao TG no consumo interno, mas ainda podem sustentar parte das exportações conforme a dinâmica do mercado global. No Cenário TG, que se trata de um exercício de contraste para testar os limites da transição no país, os esforços de mitigação não são distribuídos de forma equitativa, e o Brasil assume um ônus desproporcional, operando com um orçamento de carbono restrito a apenas ~7,24 GtCO₂ entre 2010 e 2050, valor bem inferior ao implícito em sua NDC atual.

Para cumprir esse limite, o país precisa acelerar de forma inédita a substituição do óleo e gás por bioenergia e eletricidade limpa, levando as renováveis a quase 80% da matriz em 2050. As decisões políticas para isso têm um alto custo, com grandes investimentos em infraestrutura e CCUS/BECCS, evidenciando a inviabilidade de atingir 1,5°C sem uma governança internacional mais coordenada e cooperativa.

Os cenários de transição energética desenvolvidos apresentam perfis distintos de matriz energética, tanto no total ofertado quanto nas fontes utilizadas. No entanto, em todos os cenários há necessariamente uma queda da utilização de combustíveis fósseis até 2050 e aumento do uso de fontes renováveis, conforme pode ser visto no gráfico abaixo. Isso decorre pela substituição por veículos elétricos no transporte, mas principalmente pelo uso de biocombustíveis avançados.

Gráfico 2. Energia Primária (Mtep)



Assim, as conclusões dos cenários de transição energética 2050 desenvolvidos e atualizados nesse estudo exigem dinâmicas energéticas distintas das observadas nos últimos 30 anos. Refletem a necessidade de políticas que mobilizem recursos e coordenem os atores ao longo da cadeia energética, de novos marcos e instrumentos para regular o funcionamento dos setores energético, bem como a inserção de novas tecnologia e vetores energéticos a fim de alcançar a ambição climática de neutralidade em carbono.

12. Biomassa refere-se a um conjunto amplo de resíduos agrícolas, capim elefante, recursos madeiros, óleo vegetal, gordura animal, milho e outros, exceto cana-de-açúcar, que está destacada separadamente no gráfico.

3.2. Emissões de GEE e de CO₂



Principais achados quantitativos

Emissões líquidas zero até 2050 nos cenários TB e TA, enquanto

TG exige neutralidade antes do TB (~2045), refletindo diferentes velocidades de descarbonização.

Em 2050, as emissões remanescentes concentram-se

principalmente no transporte (~7–13%) e indústria + Processos Industriais e Uso de Produtos - IPPU (~30–33%).

AFOLU é central para a neutralidade, em

cooperação com o setor de energia, com remoções líquidas de aproximadamente –795 MtCO₂eq (TB), –762 MtCO₂eq (TA) e até –1.028 MtCO₂eq (TG) em 2050.

De acordo com o World Resources Institute (WRI, 2021), as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) cresceram 51% entre 1990 e 2021, alcançando 48,3 GtCO₂e. Desse total, 74% correspondem ao CO₂, enquanto o restante é composto por outros gases, como metano e óxido nitroso. A análise setorial das emissões em 2021 revela uma forte predominância do setor energético, responsável por 75,7% das emissões globais, seguido por agricultura, florestas e outros usos da terra (14,4%), indústria (6,5%) e resíduos (3,4%). Dentro do setor energético, destacam-se as categorias de eletricidade e aquecimento (29,7%) e transportes (13,7%). Quando comparados aos dados da IEA (2023) sobre emissões de CO₂, observa-se um panorama semelhante, com mais de 85% das emissões concentradas em eletricidade e aquecimento, transportes e atividades industriais, reforçando o peso estrutural desses segmentos na agenda de mitigação climática.

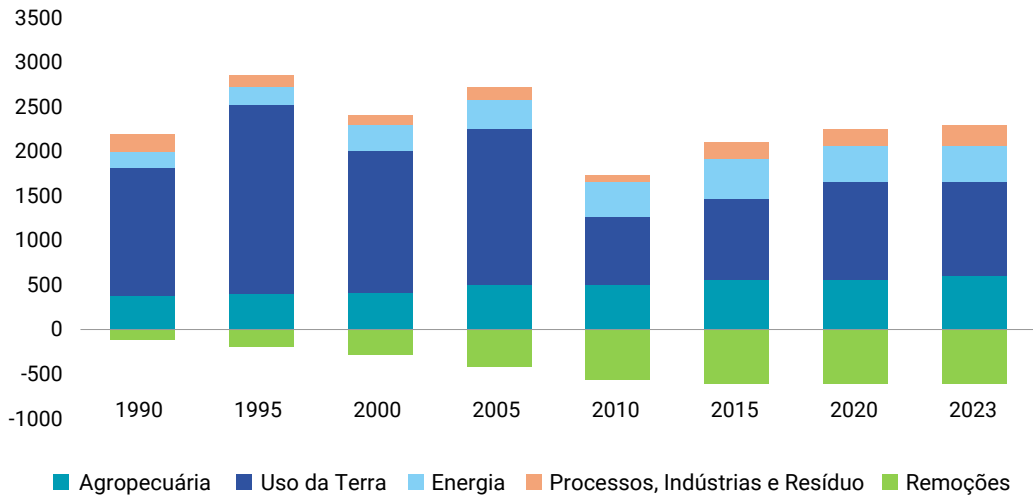
Ao contrário do padrão global, as emissões de GEE no Brasil não são majoritariamente associadas ao uso e consumo de energia – a participação do setor energético nas emissões é de apenas 20%. As emissões associadas às mudanças no uso da terra predominam, especialmente o desmatamento e a agropecuária, que juntas representam 70% das emissões totais do país (EPE, 2025).

13. A partir do SEEG 8, as mudanças na forma de cálculo de emissões de uso da terra produziram uma mudança no ano de pico das emissões brasileiras, que passou a ser 2003 e não mais em 2004 (SEEG, 2024).

Outra singularidade brasileira decorre do fato de que 65% do país é coberto por sua vegetação nativa que permanece preservada, o que torna as remoções naturais de carbono um instrumento relevante na mitigação das emissões de GEE (MAPBIOMAS, 2024). Estima-se que as remoções naturais capturem aproximadamente 0,65 GtCO₂eq por ano, o equivalente a quase 30% das emissões absolutas – fazendo com que as emissões líquidas brasileiras se situassem em torno de 1,65 GtCO₂eq em 2023 (SEEG, 2025).

Desde 1990, as emissões absolutas brasileiras de gases de efeito estufa (GEE) têm se situado acima de 2 bilhões de toneladas de CO₂ equivalentes (Gt CO₂eq) por ano, alcançado um pico histórico em 2003 com 3,2 Gt CO₂eq.¹³ Em 2023, o Brasil emitiu 2,3 GtCO₂eq, figurando entre os principais emissores globais de GEE (SEEG, 2024; WRI, 2025) Em termos per capita, as emissões brutas no país em 2023 foram de 11,3 toneladas, próximas à média mundial. O desmatamento dos biomas é responsável por elevar esse patamar, considerando que se não fosse pelas mudanças de uso da terra, o Brasil seria considerado um país de baixa intensidade de emissões (SEEG, 2024). O gráfico abaixo mostra o peso da agropecuária e uso da terra na trajetória de emissões de gases de efeito estufa no país.

Gráfico 3. Emissões históricas de GEE - Brasil



A evolução do perfil das emissões brasileiras sinaliza alguns direcionadores importantes para que Brasil alcance a neutralidade climática em 2050, que serão detalhados nos capítulos a seguir:

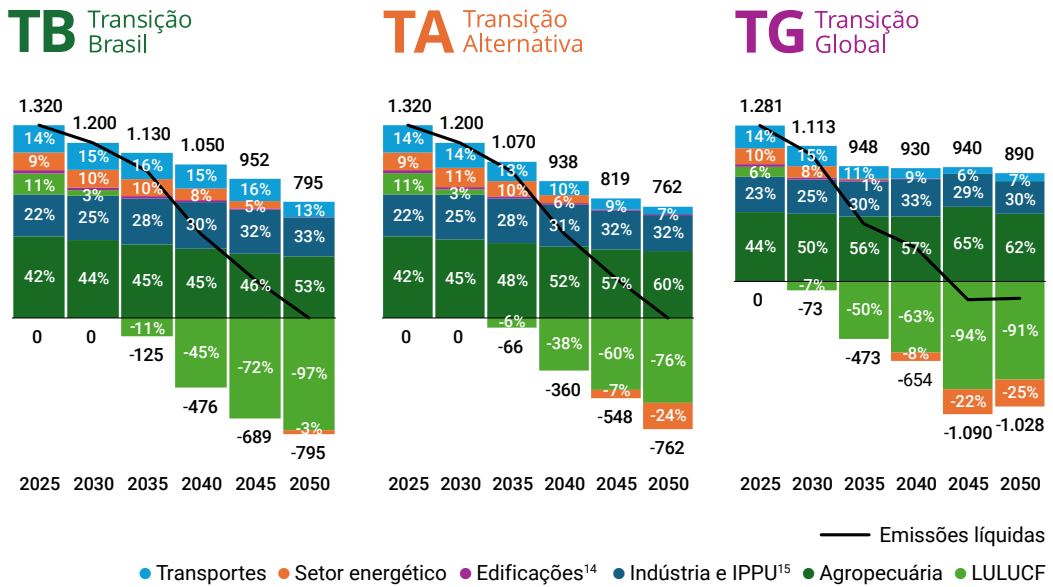
1. **Reverter a tendência de incremento de emissões** de todos os segmentos desde 2009.
2. **Fortalecer as políticas de comando e controle** para combate ao desmatamento em sinergia com as políticas de incentivo e fortalecimento das soluções baseadas na natureza.
3. **Aprimorar as medidas de redução de emissões** no setor agropecuário, o segundo principal segmento de emissão no país.
4. **Avançar com as políticas, regulações e mobilização de capital** para a implementação das soluções renováveis e de baixo carbono para o suprimento energético do país, considerando que o uso e consumo de energia representa o terceiro maior segmento de emissões de GEE brasileiras, com 420 milhões de tCO₂eq em 2023.

Os três cenários de descarbonização incorporam as mudanças estruturais para os setores de oferta e demanda de energia necessárias para uma transição energética que resulte em neutralidade climática no Brasil em 2050. No Cenário TB, as emissões nacionais caem cerca de 50% até 2030 em relação a 2005, em linha com a NDC, e atingem a neutralidade em 2050. O setor de uso da terra (AFOLU) torna-se determinante, com desmatamento ilegal zero a partir de 2030 e reflorestamento de 12 milhões de hectares até 2035, levando o setor a se tornar sumidouro líquido de carbono por volta de 2040. As emissões residuais – incluindo metano e óxido nitroso da agropecuária, bem como CO₂ dos setores de transportes e indústria – são compensadas por remoções florestais e tecnologias de emissões negativas (como BECCS).

O Cenário TA mantém as metas da NDC brasileira, porém sob condições mais desafiadoras. Com a introdução de precificação de carbono e mandatos tecnológicos, a queda do uso de fósseis no mercado interno é ainda mais rápida. Apesar da maior dificuldade em expandir fontes hidroelétricas e eólicas, o TA atinge a neutralidade em 2050 por meio da diversificação tecnológica e do uso de bioenergia (reforçada por políticas públicas, como a Lei Combustível do Futuro).

No Cenário TG, o país enfrenta um orçamento de carbono mais rigoroso. Isso obriga reduções mais rápidas, com a neutralidade atingida antes de 2050 e saldo negativo na última década. A compensação das emissões remanescentes – tanto de não-CO₂ quanto de CO₂ oriundas dos setores de transportes e indústria – exige remoções ainda maiores por meio de reflorestamento, BECCS e conservação florestal.

Gráfico 4. Emissões de GEE (MtCO₂eq)

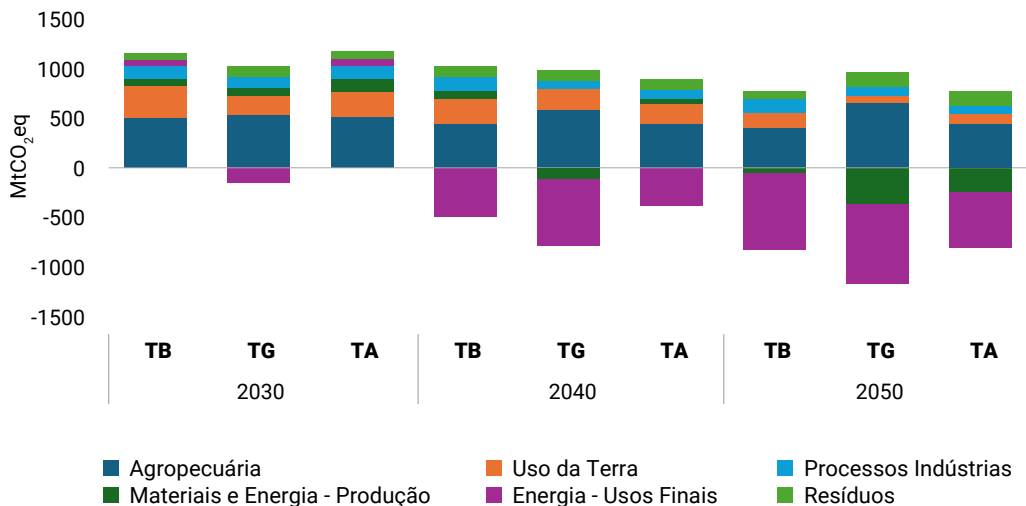


O conceito de neutralidade de emissões, assumido nos cenários de descarbonização, contempla emissões líquidas nulas para o conjunto da economia e o conjunto dos gases de efeito estufa. Neste sentido, a neutralidade pode ser alcançada com emissões positivas em alguns segmentos, sendo compensado por emissões negativas em outros. Como pode ser visto no gráfico abaixo, em 2050 ainda são estimadas emissões em torno de 0,9 GtCO₂eq oriundas majoritariamente da agropecuária, uso final de energia (indústria e transporte), processos industriais e resíduos, compensadas pelas soluções baseadas na natureza (mudanças no uso da terra) e pelas remoções no setor energético (BECCS).

14. Edificações correspondem à alocação das emissões no setor de Cidades, que abrange edificações urbanas (residenciais, comerciais e públicas) e serviços urbanos estacionários (iluminação, água/esgoto). No estudo, o setor de Cidades não inclui veículos urbanos – todo combustível queimado em automóveis, ônibus, táxis etc. está contabilizado no setor Transportes.

15. IPPU (Industrial Processes and Product Use) refere-se às emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades industriais que não estão diretamente relacionadas ao consumo de energia.

Gráfico 5. Emissões por segmento



Para que a neutralidade climática seja alcançada no ano de 2050, é necessário que ocorram anteriormente emissões negativas de CO₂ em torno de 2040, 10 anos antes do alcance da neutralidade climática no país. Em 2040, nos três cenários de descarbonização (TB, TA e TG), as emissões de CO₂ são negativas em torno de 500 milhões de toneladas.

A trajetória de emissões expressa nos cenários de descarbonização indica a insuficiência dos esforços atuais e que há muito a ser desenvolvido, não apenas para mitigar as emissões de GEE, como também para promover o volume de remoções necessário no balanço de neutralidade de 2050. Face à necessidade de haver emissões negativas de CO₂ já em 2040, não apenas é urgente interromper completamente o desmatamento das florestas nativas, como também criar os arranjos institucionais e instrumentos de mercado para promover as soluções baseadas na natureza.

Além das remoções naturais, também será necessário promover as remoções por soluções tecnológicas. A entrada de tecnologias de remoção diretamente da atmosfera (*DAC Direct Air capture*) não foi escolhida nos cenários modelados, uma vez que o Brasil dispõe de condições altamente favoráveis para promoção dos BECCS (bionergia com captura e armazenamento de carbono) associados a produção de biocombustíveis.

3.3. Sensibilidade e a precificação de carbono



Principais achados quantitativos

Em 2024, 24% das emissões globais estão cobertas por precificação de carbono (19% por comércio de emissões e 6% por tributação).

A precificação de carbono reduz marginalmente a demanda total de energia em relação ao cenário TB, reduzindo 0,6% até 2040 e 4% em 2050.

O principal efeito é na composição do mix energético: em 2050, o consumo de fósseis cai 38% e o de renováveis cresce 18% em relação ao cenário TB.

A precificação de carbono é uma abordagem econômica que visa atribuir um custo ao carbono emitido pelas fontes emissoras, refletindo o impacto ambiental das emissões de gases de efeito estufa. A precificação de carbono tem como objetivo orientar as decisões de investimento e de modelo operacional dos empreendimentos visando a redução da sua pegada de carbono, promovendo práticas e tecnologias sustentáveis e acelerando a transição para uma economia de baixo carbono. Desta forma, busca transformar a maneira como as empresas e os consumidores consideram as emissões de carbono em suas decisões, promovendo um desenvolvimento econômico mais sustentável e alinhado com as metas climáticas globais.

A precificação de carbono traz diversos benefícios. Ao internalizar os custos socioambientais das emissões de carbono, incentiva as empresas a adotarem práticas mais sustentáveis e a investirem em inovações que reduzam suas emissões. Ademais, a precificação de carbono pode gerar receitas que podem ser direcionadas para iniciativas que promovam a transição energética, a adaptação às mudanças climáticas e a proteção da biodiversidade. Em contrapartida, a implementação dos arranjos de precificação de carbono também apresenta desafios relevantes, como a definição de um preço justo que reflita adequadamente os custos ambientais, as dificuldades institucionais e política para construção de um sistema de comércio e a necessidade de garantir que as medidas não impactem desproporcionalmente as atividades econômicas.

O Brasil já participa do mercado voluntário de carbono, em que o país se destaca como um importante ofertante de créditos de carbono para o mundo, especialmente para as originações de crédito de carbono oriundas de projetos de conservação florestal REDD+ (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal), que são voltadas para empresas que voluntariamente estão interessadas em compensar as emissões de seus produtos ou processos.

Panorama dos Mecanismos de Precificação de carbono

Existem duas principais abordagens para a precificação de carbono: o imposto sobre o carbono e os sistemas de comércio de emissões. Com o Imposto sobre o carbono, estabelece-se pela regulamentação um preço fixo por tonelada de CO₂ emitido. As empresas e indústrias são tributadas com base na quantidade de carbono que liberam, o que as motiva a reduzir suas emissões para minimizar os custos. Com o valor arrecadado pelo imposto, pode-se aplicar diretamente às fontes de emissão, como usinas de energia e indústrias, e os recursos arrecadados podem ser utilizados para financiar projetos de energia renovável, eficiência energética e outras iniciativas sustentáveis.

Já o sistema de comércio de emissões, também conhecido como *cap-and-trade*, estabelece um limite total de emissões, atribuindo uma cota/permissão de emissão para cada agente emissor participante do sistema. Assim, as autoridades governamentais emitem permissões de emissão que correspondem a esse limite, e as empresas podem comprar ou vender essas permissões no mercado. As empresas mais eficientes, que conseguem reduzir suas emissões abaixo do limite, podem transacionar suas cotas/permissões excedentes para aquelas que precisam de mais tempo para se adaptar. Isso cria um incentivo econômico para que as empresas escolham tecnologias mais sustentáveis e eficientes.

Segundo o Banco Mundial¹⁶, há 20 anos menos de 1% das emissões globais estavam sujeitas a mecanismos de precificação de carbono. Já em 2024, 24% das emissões globais estão cobertas por algum mecanismo de precificação de carbono, sendo 19% comércio de emissões e 6% tributação de carbono. Este total é regulado por 89 mecanismos de precifica-

16. World Bank, State and Trends of Carbon Pricing 2025.

ção, sendo 50 arranjos nacionais e 39 subnacionais, que movimentaram um volume de receitas de US\$ 104 bilhões (cerca de 75% nos sistemas de comércio de carbono). Em relação aos preços de carbono, a faixa observada foi ampla, com alguns mercados de crédito de carbono transacionando a tonelada por alguns centavos de dólar até regime tributários com taxa de US\$167 por tonelada.

No Brasil, a Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, instituiu o sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), que estabelece o marco legal para a criação de um mercado regulado de carbono nacional aplicável às atividades, às fontes e às instalações localizadas no território nacional que emitam ou possam emitir gases de efeito estufa (GEE). Segundo este marco legal, os operadores de instalações ou fontes com emissões maiores que 10 mil tCO₂eq por ano deverão submeter o **Plano de Monitoramento** de suas emissões ao órgão gestor e enviar um **Relato de Emissões e Remoções** de gases de efeito estufa, conforme **Plano de Monitoramento** aprovado. Já os operadores com emissões superiores a 25 mil tCO₂eq receberão **“Cotas Brasileira de Emissões”** (CBEs) de acordo com seus limites de emissão e estarão sujeitos à apresentação de Relato de Conciliação periódica de obrigações frente ao órgão gestor. Isso permite estabelecer os limites de emissão de cada ator regulado, bem como comercializar ativos que representam emissões, reduções ou remoções de GEE.

O modelo adotado no Brasil, portanto, se baseia no sistema de comércio de emissões¹⁷, tendo como referência regimes similares já utilizados em diversas economias, tendo comprovado sua capacidade de proporcionar reduções relevantes de emissões. Assim, o SBCE segue uma tendência internacional e se insere como uma das principais estratégias da política climática brasileira para o enfrentamento das mudanças climáticas.

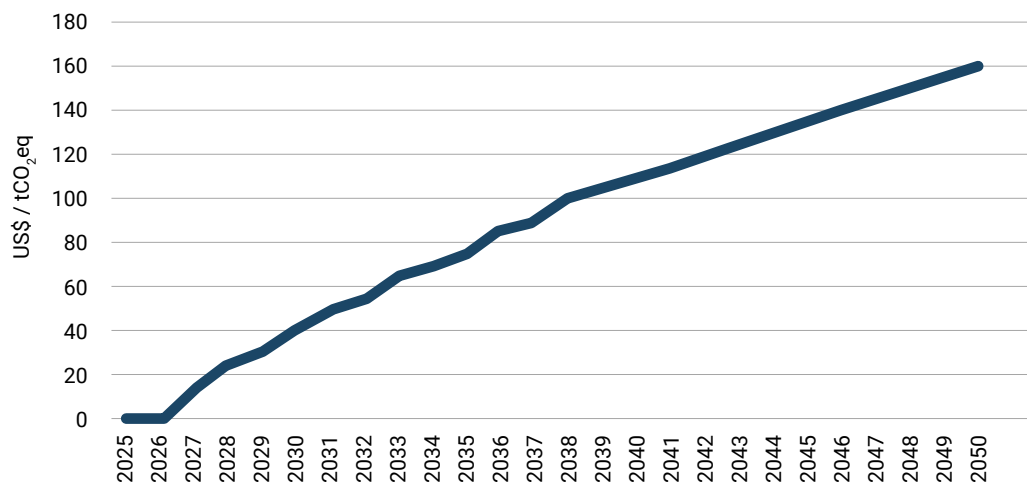
A regulamentação do SBCE deverá ocorrer no prazo de 12 meses após a publicação da lei, com possibilidade de renovação por igual período. Em seguida, é previsto um período de 2 anos, no qual os operadores (emissores) estarão sujeitos somente ao dever de submissão de plano de monitoramento e de apresentação de relato de emissões e remoções de GEE, de forma que a implementação plena do SBCE deverá ocorrer no final desta década. ●

17. O modelo brasileiro opera sob uma lógica conhecida como *“cap-and-trade”*: sistema que estabelece um limite máximo de emissões de gases de efeito estufa, determinado por uma autoridade competente.

Para endereçar as incertezas derivadas deste momento inicial de desenvolvimento da precificação de carbono no país, neste estudo foi proposto que a implementação de um sistema de comércio de carbono fosse avaliada como uma sensibilidade ao Cenário Transição Brasil (doravante TB_pc). Uma vantagem da análise de sensibilidade de carbono é poder avaliar de forma segregada o impacto da precificação do carbono na trajetória da descarbonização da economia brasileira, medindo seu grau de influência sobre o ritmo da expansão das fontes renováveis.

Como premissa de preço de carbono para a sensibilidade TB_cp foram considerado os valores (USD/tCO₂eq) indicados pela Agência Internacional de Energia no cenário Compromissos Anunciados (APS) para o conjunto de países em desenvolvimento, que inclui Brasil, China, Índia, Indonésia e África do Sul, conforme apresentado na figura abaixo. Tais valores foram atribuídos como um custo adicional a todo CO₂ emitido por fontes fósseis.

Gráfico 6. Preço de Carbono



Em termos de oferta primária de energia, a introdução de preços de carbono impactou (em relação ao cenário TB) marginalmente o total de energia utilizado no país ao longo do período, reduzindo 0,6% até 2040 e 4% em 2050. Este resultado reforça a conclusão anterior que independente das políticas energéticas, o país ainda apresentará uma dinâmica de expansão do consumo energético nos próximos 30 anos, refletindo a expansão da economia e os ganhos de bem-estar.

Já em termos de composição do mix energético, a precificação de carbono, conforme esperado, reduziu o consumo de energias fósseis como um todo em 2050, com queda de 38% em relação ao cenário TB, em benefício das energias renováveis, com aumento de 18% em relação ao cenário TB.

Comparando os resultados da sensibilidade TB_pc aos alcançados no cenário TB, como pode ser visto no gráfico abaixo, o carvão é a fonte energética que mais foi impactada até 2040 com a precificação de carbono, reduzindo sua participação em 21% e 35% em 2030 e 2040, respectivamente. No longo prazo (2050), o petróleo é a fonte que apresenta o maior recuo com a internalização dos custos sociais das emissões, reduzindo seu consumo em 43% em relação ao cenário TB. Da mesma forma, o gás natural apresenta uma demanda total 32% menor em 2050. A bioenergia (incluído os derivados de cana de açúcar), se beneficia incrementando seu uso em 5% e 19% em 2030 e 2040, respectivamente, em relação ao TB. Em 2050, os biocombustíveis avançados se expandem 46%, substituindo os derivados de petróleo nos transportes e gás natural na indústria e uso residencial. Na geração elétrica, em comparação ao cenário TB, a precificação de carbono não impacta a expansão das hidrelétricas e das nucleares, mas favorece o crescimento da eólica, especialmente em 2040 (incremento de 75%).

Gráfico 7. **Varição Oferta de Energia (2020-2050)**

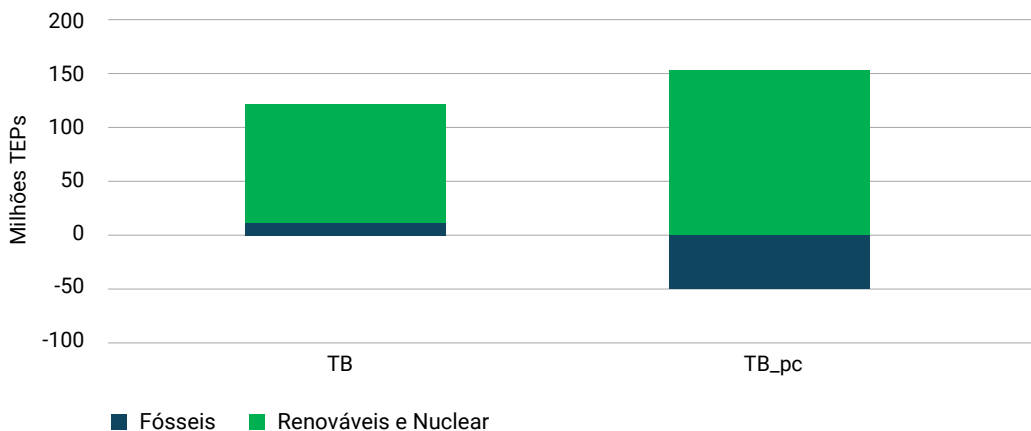
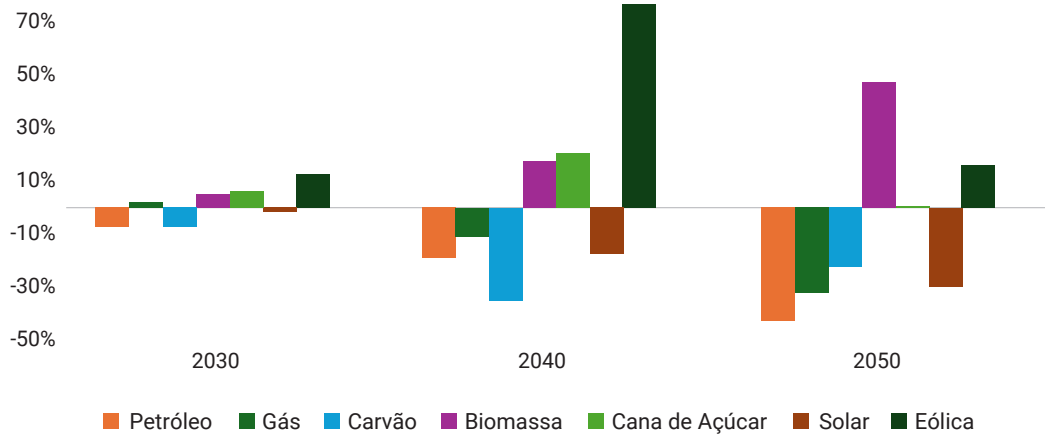
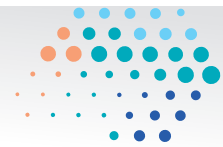


Gráfico 8. **Variação TB_pc em relação TB (%)**



3.4. Agricultura, Floresta e Uso da terra e o nexso entre clima-biodiversidade



Principais achados quantitativos

Até 2030, o manejo do solo é o principal vetor de remoção, respondendo pelo abatimento de cerca de ~200 MtCO₂.

A restauração e o reflorestamento ganham escala a partir de 2035, com impactos relevantes a partir de 2040 (~80 MtCO₂) e atingindo cerca de ~500 MtCO₂ em 2050.

As soluções baseadas na natureza (SbN) têm o potencial de entregar pelo menos um terço da redução de CO₂ com custo-benefício necessário para que as emissões estejam alinhadas com as metas do Acordo de Paris.

A relação entre clima e biodiversidade é complexa e interdependente, representando um dos maiores desafios ambientais contemporâneos. Segundo o IPCC (2022), o aquecimento global intensifica de forma significativa os riscos de perda e extin-

ção de espécies. O aumento das temperaturas e as alterações nos padrões de precipitação resultam não apenas na degradação e perda de habitats naturais, como florestas, recifes de coral e zonas úmidas, mas também na redução dos espaços de sobrevivência necessários para inúmeras espécies, ampliando o risco de extinção. Um relatório do IPBES (2019) reforça essa tendência, estimando que 47% dos mamíferos terrestres não voadores e 23% das aves ameaçadas já tenham sido negativamente impactados pelas mudanças climáticas.

Além disso, a mudança climática pode alterar interações ecológicas. A sincronização entre plantas e polinizadores, por exemplo, pode ser alterada de forma a comprometer a reprodução das plantas e, conseqüentemente, a disponibilidade de alimento para outras espécies, resultando assim em efeitos em cascata que afetam toda a cadeia alimentar e a estrutura dos ecossistemas. Da mesma forma, o aquecimento e a acidificação dos oceanos é outro aspecto crítico. A perda de recifes de coral, que são *hotspots* de biodiversidade, pode ter conseqüências devastadoras para a vida marinha e para as comunidades humanas que dependem deles.

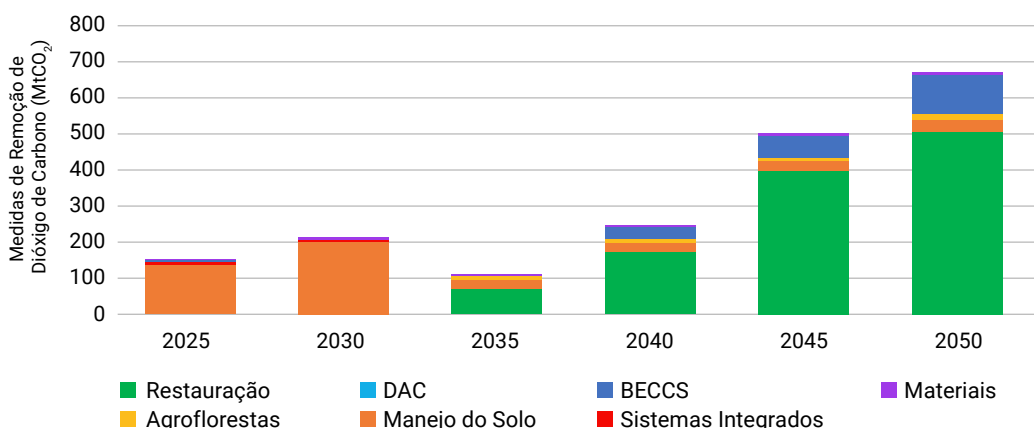
Nesse contexto, as soluções baseadas na natureza (SbN) emergem como uma abordagem eficaz para enfrentar simultaneamente os desafios das mudanças climáticas e da perda de biodiversidade. Essas soluções envolvem a conservação, restauração e manejo sustentável de ecossistemas naturais e fornecem serviços ecossistêmicos relevantes no contexto das mudanças climáticas. Além de remover carbono, geram um conjunto de cobenefícios importantes como a maior resiliência das comunidades aos impactos das mudanças do clima, segurança hídrica, promoção do equilíbrio ecológico, controle biológico de pragas e doenças. Além disso, a conservação de zonas úmidas também atua como um importante sistema de controle de inundação e purificação de água, contribuindo para a adaptação às mudanças climáticas. O manejo sustentável de áreas costeiras, como manguezais e recifes de coral, pode proteger comunidades locais dos impactos das tempestades e da erosão, ao mesmo tempo em que preserva a vida marinha.

Os cenários do IPCC, que apresentam distintas trajetórias para atingir a neutralidade de emissões até 2050, demonstram que a inclusão das SbN permite uma transição mais rápida e menos onerosa para a sociedade, seja por meio das reduções das emissões provenientes de mudanças no uso da terra (evitando a degradação dos ecossistemas e realizando a gestão da agricultura), como aumentando os sumidouros naturais por meio de restauração e reflorestamento. SbN têm o potencial de entregar pelo menos um terço da redução de CO₂ com custo-benefício necessário para que as emissões estejam alinhadas com as metas do Acordo de

Paris (meta de 2°C)¹⁸. O Brasil detém grande potencial de NbS em seu território, respondendo por aproximadamente 20% do potencial global com uma participação privilegiada tanto em termos de volume como de custo-efetividade¹⁹.

Nesse sentido, o setor de “Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo” (AFOLU, na sigla em inglês) representa as oportunidades de SbN, englobando tanto a mudança de coberturas de vegetação (mudança de uso do solo), quanto a parte de implementação de diferentes tipos de meios de produção agropecuária (uso do solo). Esse setor possui diferentes tipos de mecanismos de produção com ou sem medidas de mitigação climática, que se diferenciam entre cada região brasileira, de acordo com suas condições edafoclimáticas e níveis de mão de obra distintos (ver a seção de AFOLU).

Gráfico 9. **Mudança no Uso do Solo**



O gráfico acima ilustra as mudanças no uso do solo no Cenário Transição Brasil até 2050, destacando o papel do reflorestamento como medida relevante para remoção de dióxido de carbono. Até 2030, mudanças no manejo visando aumentar o carbono no solo é o principal vetor de remoção natural, respondendo pelo abatimento de cerca de 200 MtCO₂. Em paralelo, até o ano de 2035, ações de restauração/reflorestamento em larga escala (restauro ecológico e florestas plantadas) são realizadas, que terão seu impacto, em termos de remoção, observados a partir de 2040, possibilitando a

18. Segundo Goodman e Herold (2014) “Why Maintaining Tropical Forests Is Essential and Urgent for a Stable Climate”, somente florestas tropicais poderiam reduzir as atuais emissões globais entre 24%-30%.

19. Referências obtidas em Griscom, et al. (2020) “National mitigation potential from natural climate solutions in the tropics”.

remoção de cerca de 80 MtCO₂, alcançando o patamar de 500 MtCO₂ em 2050. Os sistemas agroflorestais também são vetores relevantes de sumidouro de carbono.

Para alcançar estes volumes de remoção natural de carbono se faz imperativo uma profunda mudança no uso do solo. Além da eliminação até 2030 do desmatamento de vegetação nativa, é necessário converter entre 50 milhões de hectares (equivalente ao território da França) e 92 milhões de hectares (equivalente ao território Nigéria) em sumidouros de carbono.

Além disso, os esquemas integração lavoura-pecuária (IPL) e integração lavoura-pecuária-floresta (IPLF) possuem um papel relevante. Esse tipo de sistema é importante visto que ele permite a implementação de diferentes cultivos e criações em um mesmo território, permitindo a mitigação climática devido à estocagem de carbono abaixo e acima do solo e à integração dessas florestas plantadas à cadeia de produção de biocombustíveis avançados. Em relação à conservação e restauro de florestas nativas, os cenários tiveram como premissa a realização de 10-12 milhões de hectares de restauro ecológico, com ganhos importantes para biodiversidade e remoção de emissões.

3.5. Transição energética justa e inclusão social



Principais achados quantitativos

Os setores de construção e agropecuária concentram cerca de 25% do potencial de geração de empregos verdes, com destaque para o Norte e Nordeste, onde podem responder por até 30% dos novos postos até 2050, ante cerca de 20% nas demais regiões.

A redução gradual da cadeia fóssil implica a perda de empregos, sobretudo no Sudeste — região fortemente vinculada à exploração de óleo e gás —, exigindo políticas de requalificação profissional e estratégias estruturadas de diversificação econômica para mitigar impactos socioeconômicos.

Segundo o WRI,²⁰ não existe uma abordagem única para uma transição justa, mas ela pode ser entendida pela necessidade de equilibrar de forma equitativa os custos e benefícios da transição, sem deixar ninguém para trás. Abordar o enfrentamento às mudanças climáticas de maneira equitativa, justa e inclusiva significa criar oportunidades de trabalho decentes para todos, evitar riscos de desemprego e adotar uma abordagem inclusiva para lidar com os desafios associados à transição. A ideia de uma “transição justa” ganhou destaque quando foi incluída no Acordo de Paris em 2015, e passou a fazer parte dos planos e políticas nacionais.

Essa questão tem sido tópico chave de discussões em fóruns recentes como o G20 e a COP 30, buscando estabelecer mecanismos, como o Mecanismo de Ação de Belém (BAM) para uma Transição Justa Global aprovado na COP30, para reforçar a assistência técnica, capacitação e compartilhamento de conhecimento nesse tema.²¹ A inclusão de diretrizes relacionadas à transição justa na transformação dos sistemas energéticos é relevante para assegurar que os benefícios e os custos decorrentes dessas mudanças sejam distribuídos de forma equitativa entre os países e as regiões (EPE, 2025).

No contexto brasileiro, as fontes fósseis são geradoras de empregos e renda e suprem as necessidades básicas de parte da população. Garantir que a mudança para uma economia de baixo carbono ocorra de forma inclusiva e equitativa exige a incorporação de diretrizes como o diálogo social e participação das partes interessadas, políticas públicas voltadas para inclusão, empregos de qualidade e requalificação da força de trabalho, bem como ações coordenadas para reduzir desigualdades regionais no país.

A expansão acelerada das energias renováveis e declínio gradual da indústria fóssil no longo prazo afetam de maneira distinta territórios, setores e grupos sociais, elevando os riscos de que populações vulnerabilizadas sejam excluídas dos benefícios econômicos gerados pela transição energética ou que essa transformação aprofunde desigualdades já existentes (EPE, 2025). O estudo macroeconômico do PTE2 indica que, mesmo em cenários de maior restrição (TG e TA), o Brasil pode alcançar crescimento acumulado do PIB entre 1,2% e 1,5% até 2050 em relação à linha de base, com geração líquida de 28 milhões de empregos no período. Os setores de construção e agropecuária, por exemplo, representam um quarto dessa geração e trazem importantes oportunidades de geração de empregos verdes, especialmente

20. <https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-que-e-uma-transicao-justa-e-como-esta-o-progresso-dos-paises>

21. <https://www.weforum.org/stories/2025/12/what-happened-cop30-whats-next/>

nas regiões Norte e Nordeste, onde a participação desses setores chega a 30% dos novos empregos até 2050, vs. cerca de 20% nas demais regiões.

Por outro lado, a redução gradual da cadeia fóssil implica na perda de empregos concentrada em regiões específicas (notadamente no Sudeste, ligadas à exploração de óleo e gás), exigindo programas robustos de requalificação profissional. A correção desse desequilíbrio, por meio de redistribuição dos benefícios e mitigação dos custos sociais, é condição central para que a transição seja justa.

A transição energética pode, portanto, representar uma janela de oportunidade: não apenas para gerar emprego e renda a partir das potencialidades energéticas brasileiras, mas também para promover inclusão social, combater a pobreza energética e reduzir desigualdades regionais. Transformar essa oportunidade em realidade depende de coordenação entre governo, setor privado e sociedade civil, para que as condições de justiça social estejam presentes em todas as fases da descarbonização.



4 Roadmaps Setoriais

A transição energética não se concretiza apenas em metas nacionais ou projeções agregadas: ela depende de mudanças específicas em cada setor da economia, articuladas de forma coerente e factível no tempo. Por isso, o PTE2 vai além da construção de cenários macroeconômicos e apresenta roadmaps setoriais para cinco áreas estratégicas: AFOLU (agricultura, florestas e uso do solo), Indústria, Cidades, Transporte e Energia.

Esses *roadmaps* se baseiam nos resultados quantitativos de modelagem para propor ações práticas de transformação, destacando marcos intermediários, tecnologias críticas, políticas públicas necessárias e oportunidades de mercado em cada segmento. Mais do que descrever reduções de emissões, eles sugerem ações que possibilitam o alcance das trajetórias determinadas pelos resultados da modelagem, conciliando viabilidade técnica, competitividade econômica e inclusão social.

Os *roadmaps* representam visões de futuro e interpretações que não derivam exclusivamente dos resultados dos modelos utilizados, podendo também se basear em dados de organizações parceiras, bem como em evidências e projeções sobre o status atual da transição. Logo, buscam ir além dos cenários quantitativos, oferecendo um passo a passo prático para alcançar essas trajetórias possíveis, incorporando análises complementares.

A elaboração dos *roadmaps* foi coordenada pelo CEBRI, e contou com interação entre instituições parceiras e atores setoriais²², por meio de reuniões restritas, consultas e debates multissetoriais.

Dessa forma, incorporam tanto a robustez da modelagem integrada (energia, economia e uso da terra) quanto a experiência e visão de *stakeholders* de governo, empresas, academia e sociedade civil.

O resultado é um conjunto de trajetórias setoriais convergentes, que iluminam caminhos de descarbonização viáveis para o Brasil, sinalizando os principais pontos de atenção, os desafios de implementação e as oportunidades estratégicas de cada setor. Esses *roadmaps* formam, portanto, um guia para orientar políticas públicas e investimentos privados, contribuindo para que o país avance de forma coordenada rumo à neutralidade climática até 2050.

4.1. AFOLU



Principais achados quantitativos

Atualmente, o o segmento AFOLU responde pela maior parte das emissões brasileiras (~70% do total).

Em 2040-2050, AFOLU passa a responder por mais de 83% das remoções de carbono necessárias à neutralidade climática do país.

A captura de carbono cresce fortemente após 2040 em todos os cenários, alcançando cerca de ~560 MtCO₂ (TB), ~375 MtCO₂ (TA) e ~580 MtCO₂ (TG) em 2050.

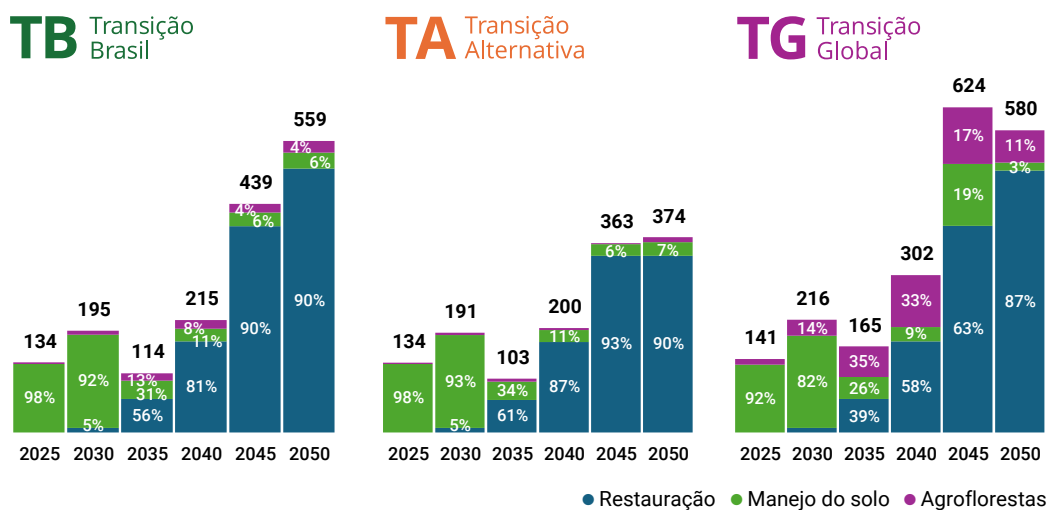
22. A construção desses roadmaps contou com a participação ativa e colaborativa de diversos *stakeholders* e instituições parceiras, que contribuíram com análises e insights essenciais para o seu desenvolvimento. Destacam-se: as empresas patrocinadoras do projeto, BID, BNDES, Catavento, Climate Emergency Collaboration, CNI, CNT, EPE, FGV, FIESP, ICS, ICAO, IBAMA, Imafloira, Instituto E+ Transição Energética, IPAM, IRENA, IWA Asset Management, MDIC, Ultra e WWF-Brasil, entre outros. Os autores gostariam de agradecer aos participantes por suas contribuições

O setor de Agricultura, Florestas e Uso do Solo (AFOLU, sigla em inglês) é decisivo para a neutralidade climática do Brasil e, segundo os resultados da modelagem do modelo BLUES, é também aquele que pode apresentar as maiores reduções líquidas de emissões ao longo das próximas décadas.

Nos cenários do PTE2, o fim do desmatamento ilegal a partir de 2030 e a restauração de 12 milhões de hectares de florestas até 2035 levam a uma queda acentuada das emissões líquidas já na próxima década. A partir de meados dos anos 2040, o setor passa a ser sumidouro líquido de carbono, removendo mais CO₂ da atmosfera do que emite. Essa inflexão ocorre graças à combinação de queda quase total das emissões por mudança de uso da terra com o aumento do sequestro florestal. Expansão da biomassa ocorre sem exercer pressão significativa sobre o desmatamento ou o uso da terra. Nesse contexto, a consistência entre restauração florestal e bioenergia é preservada: elas não competem diretamente, mas podem interagir de forma complementar.

Mesmo considerando as emissões residuais de metano e óxido nitroso da agropecuária, as remoções adicionais tornam o AFOLU um pilar de compensação para os demais setores. Em 2050, o setor apresenta um saldo líquido negativo em todos os cenários, confirmando seu papel central na estratégia brasileira de descarbonização.

Gráfico 10. **Captura de Carbono (MtCO₂)**



Conforme apresentado anteriormente, o segmento AFOLU responde pela maior parte das emissões brasileiras (70% do total), sendo central para viabilizar uma trajetória eficiente de neutralidade de carbono no país em 2050 (EPE, 2025). Em contrapartida, o segmento apresenta um conjunto de opções atrativas de mitigação de baixo custo, de forma que quanto maior a redução de emissões no segmento AFOLU menor é a pressão no setor energético para introdução antecipada e onerosa de soluções redutoras de suas emissões, favorecendo uma transição energética de menor custo para o país.

Curto Prazo (2025-2030):

Eliminação do desmatamento ilegal

Entre 2025 e 2030, o foco do setor AFOLU recai sobre a eliminação do desmatamento ilegal e o início de uma transformação estrutural na forma de uso da terra. Nesse período, ganha escala a recuperação de pastagens degradadas e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, apoiadas por incentivos e modelos econômicos aprimorados para pagamentos por serviços ambientais (PSA). Paralelamente, programas de reflorestamento e restauração ecológica começam a ser implementados em larga escala, com a meta de restaurar cerca de 12 milhões de hectares até 2035, reforçando a capacidade de remoção de carbono e de recuperação de ecossistemas.

O uso do fogo no manejo de pastagens passa a ser progressivamente eliminado (MAPBIOMAS, 2024b). Assim, reduzindo riscos de incêndios e emissões associadas, enquanto melhorias no manejo de solos possibilitam remoções líquidas significativas de CO₂ já em 2030, na ordem de ~180 MtCO₂/ano, em paralelo à redução das emissões na agropecuária. A frota de máquinas agrícolas começa a ser renovada, incorporando tratores, colheitadeiras e pulverizadores mais eficientes, com eletrificação ainda marginal, mas crescente. Por fim, o aumento da eficiência das pastagens, por meio de técnicas regenerativas e de infraestrutura básica como currais e bebedouros, eleva a produtividade por hectare, permitindo reduzir a pressão por novas áreas e consolidar um ciclo virtuoso de intensificação sustentável no campo (EMBRAPA, 2020; IMAFLORA, 2016).

Médio Prazo (2030-2040):

Avanço da transformação do uso do solo

Entre 2030 e 2040, o setor AFOLU entra em uma fase de transformação estrutural do uso da terra, ampliando sua contribuição como sumidouro líquido de carbono. Nesse período, cerca de 25 milhões de hectares são convertidos em áreas de remoção de emissões, combinando ~3 milhões de hectares de reflorestamento com a expansão expressiva da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), que atinge aproximadamente 24 milhões de hectares. Essa expansão marca a transição da recuperação de áreas degradadas para um modelo produtivo regenerativo, capaz de conciliar produtividade, rentabilidade e serviços ecossistêmicos.

As tecnologias de agricultura de baixo carbono tornam-se amplamente difundidas, consolidando ganhos de eficiência e redução de emissões não-CO₂. Práticas como a fixação biológica de nitrogênio, a melhoria da dieta animal e o manejo eficiente de dejetos, com uso crescente de biodigestores, reduzem de forma significativa as emissões de metano e óxido nitroso (IMAFLOA, 2025). Paralelamente, o país avança na proteção florestal, garantindo a integridade das áreas restauradas e ampliando o papel estratégico das florestas na mitigação climática.

Esse período representa o amadurecimento do modelo agroambiental brasileiro, no qual a produtividade agropecuária e a conservação ambiental passam a caminhar juntas, fortalecendo o Brasil como referência global em agricultura sustentável e de baixo carbono.

Longo Prazo (2040-2050):

Consolidação do AFOLU como setor sumidouro líquido de carbono

Na década final do horizonte da análise, o setor AFOLU consolida-se como principal pilar da neutralidade climática brasileira, tornando-se um sumidouro líquido de carbono em escala globalmente relevante. Florestas plantadas e nativas em expansão passam a remover quantidades maciças de CO₂, alcançando cerca de 500 MtCO₂ por ano. Os sistemas agroflorestais e de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) tornam-se padrão produtivo dominante, incorporando bioinsumos e práticas regenerativas que reduzem a dependência de insumos sintéticos e intensificam a captura de carbono nos solos e na biomassa.

Com essas transformações, o AFOLU passa a responder por mais de 83% das remoções de carbono necessárias à neutralidade climática do país, ampliando ao mesmo tempo os cobenefícios ambientais e sociais – proteção da biodiversidade, segurança hídrica e geração de empregos verdes em cadeias ligadas ao reflorestamento, manejo florestal sustentável e agricultura de baixo impacto.

A dinamização econômica das regiões Norte e Centro-Oeste, impulsionada por projetos de reflorestamento comercial e restauração ecológica, fortalece o PIB regional e consolida o papel do setor como vetor de desenvolvimento sustentável. Assim, o Brasil entra na metade do século XXI com uma agropecuária de base florestal, inovadora e de balanço climático positivo, transformando o uso da terra em ativo estratégico para prosperidade e estabilidade ambiental.

Papel dos formuladores de políticas públicas

A consolidação do AFOLU como setor-chave da neutralidade climática dependerá de políticas públicas consistentes, de longo prazo e territorialmente integradas. Cabe ao Estado criar um ambiente regulatório que alinhe incentivos econômicos à conservação e à produção sustentável, fortalecendo o combate ao desmatamento, a valorização dos serviços ecossistêmicos e a difusão de tecnologias de baixa emissão. A ação coordenada entre governo federal, estados e municípios deve assegurar segurança jurídica, financiamento verde e previsibilidade para os agentes privados, viabilizando a escala necessária para que as soluções baseadas na natureza se tornem pilares duradouros da estratégia climática brasileira.

1. Cumprimento rigoroso das metas de desmatamento ilegal zero a partir de 2030

- Criar mecanismos de comando e controle mais eficientes.
- Ampliar unidades de conservação e terras indígenas para proteger estoques de carbono naturais.

2. Incentivo a remoções e agricultura sustentável

- Implantar pagamentos por serviços ambientais e créditos de carbono florestais, em conformidade com iniciativas como a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA).

- Expandir programas como o Plano ABC+ para difundir práticas de baixa emissão (ILPF, plantio direto, fixação biológica), com assistência técnica (agrônomos, veterinários, técnicos agrícolas) para pequenos produtores (IPAM, 2017).
- Desenvolver planos de adequação ambiental de imóveis rurais.
- Definir uma taxonomia rural sustentável nacional e normativos para a rastreabilidade sanitária e socioambiental.

3. Políticas habilitadoras e planejamento de longo prazo

- Implementar metas setoriais claras de remoção de CO₂ e redução de emissões agropecuárias, conforme as diretrizes do Plano Clima (ex.: hectares a restaurar por ano, porcentagem de área agrícola sob práticas sustentáveis).
- Criar linhas de crédito verde e seguro agrícola para agricultores que adotam tecnologias de baixo carbono, e fomentar P&D em pecuária de baixa emissão (melhoramento genético, aditivos alimentares anti-metano).

4. Mercados de carbono e valorização econômica

- Estruturar um mercado de carbono que inclua AFOLU, fortalecendo o SBCE.
- Alavancar o potencial brasileiro de soluções baseadas na natureza (NBS) por meio de parcerias internacionais e acesso a fundos climáticos.
- Criar incentivos comerciais para produtos agropecuários livres de desmatamento.

Oportunidades para o setor privado

A crescente demanda por créditos de carbono de alta integridade, a expansão da bioeconomia e a difusão de tecnologias agrícolas sustentáveis criam mercados emergentes capazes de combinar rentabilidade e impacto ambiental positivo. Empresas, cooperativas e investidores podem se posicionar como protagonistas dessa transformação ao desenvolver cadeias produtivas regenerativas, integrar-se a sistemas de finanças verdes e explorar modelos inovadores de negócios baseados na natureza. Com escala, inovação e governança, o setor privado tem o potencial de converter a agenda climática em vantagem competitiva global para o agronegócio e a indústria florestal brasileira.

1. Mercado de restauração e créditos de carbono

- Demanda crescente por créditos de carbono de alta integridade incentiva o reflorestamento comercial e restauração ecológica em larga escala.
- Plantio de espécies nativas e exóticas para fins madeireiros, energéticos e compensação de emissões.

2. Tecnologias de baixo carbono na agropecuária

- Aquecimento do mercado de empresas e startups que desenvolvem soluções climáticas para a agropecuária.
- Desenvolvimento de infraestrutura e equipamentos para intensificação sustentável da agricultura (irrigação solar, máquinas agrícolas elétricas ou híbridas).

3. Bioeconomia e cadeias de valor sustentáveis

- Crescimento de bioindústrias que agreguem valor à floresta em pé e à produção sustentável, como manejo sustentável de madeira e biocombustíveis avançados.
- Exportação de soluções baseadas na natureza e insumos de baixo carbono.
- Expansão dos serviços ambientais impulsionada pelos setores industriais que buscam atingir suas metas de redução das emissões.
- Aumento da produtividade agrícola por meio da recuperação de pastagem.

4. Engajamento em finanças verdes e seguros

- Ampliação de Fundos de investimento e *green bonds*.
- Disponibilidade de veículos dedicados a produtores rurais que cumpram metas ambientais (ex.: Certificado de Recebíveis do Agronegócio (CRA) verde).
- Incorporação de critérios de sustentabilidade em seguros e financiamento agrícola, reduzindo risco para agricultores sustentáveis.

4.2. Indústria



Principais achados quantitativos

O consumo industrial cresce moderadamente até 2050, passando de cerca de 2,5 EJ em 2025 para ~3,5 EJ em 2050.

A eletrificação, biomassa e biogás ganham participação nas indústrias, com eletricidade alcançando cerca de ~28–32%, a biomassa representando ~27%-29% e o biogás crescendo para cerca de ~12-24% em 2050.

Combustíveis fósseis perdem espaço, mas permanecem relevantes, com gás natural, derivados de petróleo e carvão somando cerca de ~14-30% do consumo industrial em 2050.

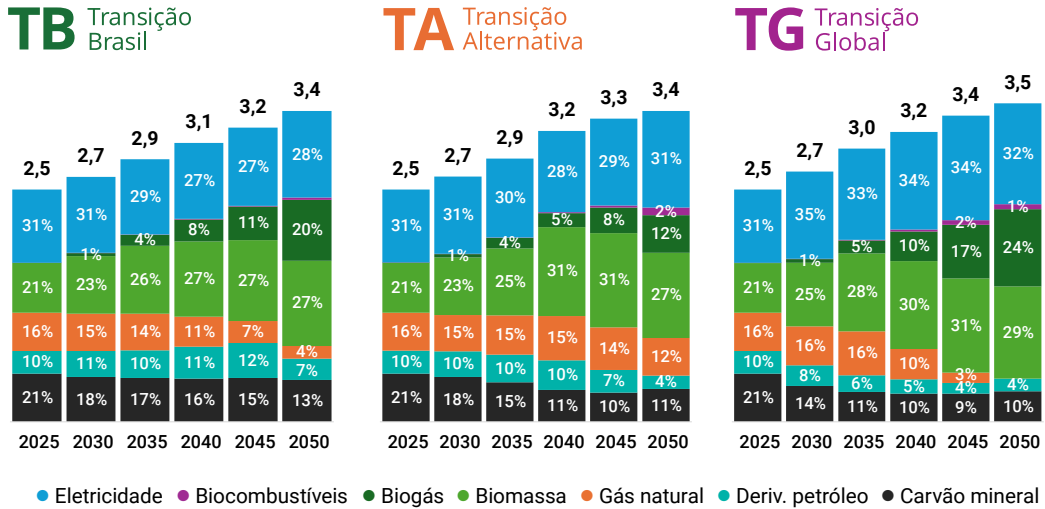
Os resultados do modelo BLUES mostram que a indústria brasileira pode reduzir suas emissões de forma expressiva até 2050, mesmo diante do crescimento da produção.

No Cenário TB, as emissões energéticas do setor, que hoje representam ~87 MtCO₂eq, caem gradualmente para cerca de 66MtCO₂eq em 2050, impulsionadas pela substituição de combustíveis fósseis por biomassa, eletrificação de processos térmicos de baixa e média temperatura e ganhos de eficiência.

Já no Cenário TA, a introdução da precificação de carbono acelera a saída dos fósseis e amplia a participação de rotas renováveis, levando a emissões energéticas do setor finais em torno de 66 MtCO₂eq em 2050. Em todos os cenários, portanto, a intensidade de carbono da indústria cai substancialmente, reforçando que o setor pode manter competitividade e crescimento econômico ao mesmo tempo em que contribui para a meta de neutralidade climática.

No Cenário TG, mais restritivo, a queda é ainda mais acentuada: as emissões energéticas industriais se aproximam de 40 MtCO₂eq em 2050, o que exige a adoção adicional de tecnologias emergentes como hidrogênio verde na siderurgia e captura e armazenamento de carbono (CCUS) no cimento e em processos químicos.

Gráfico 11. Consumo Industrial (EJ)



Curto Prazo (2025-2030):

Início da modernização industrial com foco em eficiência energética

Entre 2025 e 2030, o setor industrial brasileiro inicia uma fase decisiva de modernização, marcada pela incorporação de tecnologias mais limpas, ganhos de eficiência e pelo surgimento de novos segmentos produtivos voltados à transição energética. Na siderurgia, intensifica-se o uso de carvão vegetal renovável em altos-fornos dedicados, abrindo caminho para a consolidação das rotas de aço verde e a redução progressiva da dependência de insumos fósseis. No setor de cimento, o avanço do coprocessamento de resíduos e biomassa nos fornos (superando 20% de substituição térmica) representa um salto em direção à descarbonização, ao mesmo tempo em que reduz custos e emissões associadas à destinação de rejeitos.

A indústria química e de fertilizantes dá os primeiros passos na adoção de matérias-primas verdes, explorando alternativas derivadas de biomassa e hidrogênio de baixo carbono. Paralelamente, ganham força as iniciativas de desenvolvimento de uma indústria nacional “verde” de bens de capital, voltadas à produção local de aerogeradores, baterias, eletrolisadores e equipamentos para energia renovável, fundamentais para reduzir a dependência de importações e ampliar o conteúdo tecnológico nacional.

A agenda de eficiência energética se consolida como eixo transversal, estimulando modernizações de processo, digitalização e melhor aproveitamento energético nas plantas industriais. Em paralelo, a economia circular começa a se expandir, com destaque para iniciativas de mineração urbana e o fortalecimento de cadeias logísticas para reaproveitamento de resíduos e subprodutos, conectando sustentabilidade, inovação e competitividade industrial (ICS, 2025).

Médio Prazo (2030-2040):

Transformação tecnológica e *fuel switching* acelerados na indústria brasileira

Durante a década de 2030, a indústria brasileira entra em um ciclo de transformação tecnológica profunda, com a substituição progressiva de combustíveis fósseis e a difusão de tecnologias de baixo carbono em larga escala. A siderurgia amplia significativamente o uso de carvão vegetal renovável e biomassa, consolidando a produção de aço de baixa emissão. Nesse mesmo período, inicia-se a substituição do gás natural por biometano, reduzindo a pegada de carbono dos processos térmicos e fortalecendo os elos entre os setores industrial, energético e agropecuário.

O setor de cimento aprofunda sua transição, expandindo o coprocessamento de resíduos e biomassa e incorporando unidades piloto de captura e armazenamento de carbono (CCS), passo essencial para enfrentar as emissões de processo inerentes à produção de clínquer. Além disso, cresce o uso de substitutos de clínquer, aproveitando resíduos industriais e minerais alternativos, o que permite reduzir significativamente a intensidade de emissões por tonelada de cimento produzido. Na indústria química e de fertilizantes, avança o uso de matérias-primas verdes e de biomateriais, com maior integração a cadeias produtivas baseadas em biomassa e hidrogênio de baixo carbono.

Ao mesmo tempo, o país promove um acoplamento estratégico entre as políticas energética e industrial, garantindo que o setor elétrico e o parque fabril evoluam de forma coordenada, assegurando custos competitivos, estabilidade de suprimento e estímulo à inovação tecnológica. A integração entre política energética e industrial viabiliza a descarbonização da base produtiva nacional, garantindo eletricidade renovável a preços competitivos – o que é especialmente relevante em um contexto de crescente eletrificação dos processos industriais (Instituto E+ Transição Ener-

gética, 2025). Esse período marca, portanto, a consolidação da indústria brasileira como plataforma de transição energética, na qual eficiência, inovação e descarbonização caminham juntas para redefinir a base produtiva do país.

Longo Prazo (2040-2050):

Avanços finais da transição energética

Entre 2040 e 2050, o parque industrial brasileiro alcança um novo patamar de maturidade tecnológica e competitividade climática, completando o ciclo de transição rumo à neutralidade de emissões. A siderurgia amplia o uso de biometano em substituição ao gás natural fóssil, reduzindo drasticamente a intensidade de carbono do aço nacional e consolidando o país como referência em aço verde competitivo nos mercados internacionais.

No setor de cimento, a captura e armazenamento de carbono (CCS) torna-se plenamente operacional, integrando-se às rotas de produção e viabilizando reduções expressivas na intensidade de carbono por tonelada de clínquer. Ao mesmo tempo, a indústria química e de fertilizantes atinge um marco simbólico: mais de 50% do consumo energético baseado em matérias-primas verdes, impulsionando a expansão dos biomateriais e reforçando o papel do Brasil como fornecedor global de insumos sustentáveis.

Outros processos industriais passam a adotar eletrificação direta, biomassa sustentável e tecnologias de captura de carbono, conforme a natureza de cada segmento produtivo, completando a diversificação das rotas de mitigação. Por fim, a consolidação de um setor de bens de capital “verde”, capaz de produzir localmente equipamentos, máquinas e tecnologias limpas, torna-se um dos legados estruturais da transição energética — posicionando o Brasil como exportador de soluções industriais sustentáveis e garantindo autonomia tecnológica em sua trajetória rumo à neutralidade climática.

Papel dos formuladores de políticas públicas

A descarbonização da indústria brasileira exige políticas públicas integradas, coordenadas e orientadas por metas de competitividade e inovação. Cabe ao poder público criar condições estruturais e regulatórias que acelerem a modernização do parque industrial, combinando regulação de eficiência, instrumentos financeiros verdes e incentivos à inovação tecnológica. Além disso, é essencial o fortalecimento de mecanismos de mercado e normas de carbono, capazes de valorizar a produção de baixo impacto, e a criação de infraestruturas habilitadoras – físicas, tecnológicas e humanas – que sustentem a transição em larga escala e garantam a inclusão de pequenas e médias empresas no processo.

1. Regulação de eficiência e financiamento verde

- Exigir padrões mínimos de desempenho energético e planos de gestão energética em indústrias intensivas.
- Premiar fábricas que atinjam benchmarks internacionais de intensidade energética.
- Expandir linhas de crédito (via BNDES, bancos regionais) para retrofit de instalações e para recuperação de calor.
- Fortalecer fundos de transição de pequenas e médias indústrias.

2. Fomento à inovação e tecnologias emergentes

- Integrar política energética e industrial para fortalecer a competitividade e inovação, facilitando o desenvolvimento de novas cadeias de valor.
- Lançar iniciativas público-privadas de P&D direcionadas aos setores *hard-to-abate* (ex: um programa nacional do aço verde).
- Desonerar equipamentos e insumos estratégicos à descarbonização (eletrolisadores, bombas de calor industriais, sensores IoT, sistemas de captura de carbono).
- Promover uma atuação coordenada entre BNDES, FINEP e MCTI.
- Instituir ambientes regulatórios experimentais (sandbox regulatório) para tecnologias emergentes no setor energético.

3. Mecanismos de mercado e normativos de carbono

- Usar a precificação de carbono para induzir a troca de combustíveis e medidas de mitigação.
- Introduzir gradualmente parâmetros normativos de carbono (ex: intensidade de CO₂ por tonelada de cimento ou aço).
- Utilizar o poder de compra governamental para incentivar a demanda de materiais verdes (ex: obras públicas privilegiando materiais de baixo carbono).
- Garantir interoperabilidade entre mercados regulados e voluntários de carbono, evitando dupla contagem e assegurando integridade ambiental.

4. Infraestrutura habilitadora

- Apoiar a formação e requalificação da mão de obra industrial.
- Estimular a criação de clusters industriais, ampliando o acesso a infraestrutura energética e logística compartilhada e polos de CCS com injeção em reservatórios exauridos.
- Possibilitar a integração de hubs de produção de biometano à rede de gás natural.
- Planejar infraestrutura energética com visão integrada (eletricidade, gás, CO₂, hidrogênio), evitando soluções isoladas e maximizando sinergias regionais.

Oportunidades para o setor privado

A transição industrial de baixo carbono abre um leque crescente de oportunidades econômicas, tecnológicas e financeiras para o setor privado brasileiro. Empresas que investirem desde cedo em tecnologias limpas, bioenergia e economia circular poderão não apenas reduzir riscos regulatórios, mas também ganhar competitividade nos mercados globais. O cenário é favorável à criação de novas cadeias produtivas, ao financiamento verde de projetos de transição e ao posicionamento estratégico em mercados que valorizam produtos e insumos de baixo carbono. Ao aproveitar o potencial renovável da matriz energética nacional, o setor privado pode se tornar protagonista da reindustrialização sustentável do país, combinando inovação, rentabilidade e liderança climática.

1. Tecnologia industrial limpa

- Desenvolvimento de *startups* (eletrólise mais eficiente, células a combustível industriais e hidrogênio de biomassa/biogás com captura de carbono), além de soluções em CCS (solventes, utilidades do CO₂ capturado), e materiais inovadores.
- Alocação de capital de venture capital ou *private equity* para essas tecnologias, respondendo à demanda da indústria global para zerar emissões até 2050.

2. Bioenergia e economia circular

- Expansão das cadeias de suprimento de biomassa e resíduos para uso industrial.
- Plantio de florestas energéticas, produção de pellets.
- Gestão e processamento de resíduos agrícolas e urbanos para combustível ou uso circular de materiais (como sucata metálica, reutilização de escória de alto-forno em cimento).

3. Financiamento de projetos de transição

- Aumento na demanda por capital para modificar e construir instalações (fornos elétricos, eletrolisadores, plantas de bioinsumos).
- Expansão de instrumentos como green bonds industriais, empréstimos atrelados a metas climáticas (*Sustainability-Linked Loans*) e debêntures de infraestrutura verdes, que tendem a ter condições vantajosas e alta demanda.
- Regulação do mercado de carbono incentiva demanda (*offtake*) por produtos de baixo carbono.

4. Competitividade e acesso a mercados

- Geração de vantagem comercial e valorização de mercado de empresas que se adequarem a possíveis barreiras de carbono (como o *Carbon Border Adjustment Mechanism* – CBAM europeu).
- Atendimento a exigências de compradores globais podendo garantir prêmio de preço e preferência.
- Consolidação de um setor de bens de capital competitivo no país.
- Aproveitamento do alto grau de renovabilidade da matriz energética brasileira como diferencial competitivo.

4.3. Setor Energético



Principais achados quantitativos

Geração elétrica quase 100% renovável até 2050, com dominância de eólica e solar.

Fósseis reduzem fortemente a participação no setor energético: derivados de petróleo caem de ~50% do consumo total de combustíveis em 2025 para ~20-35% em 2050.

Consumo total de energia diminui no período analisado, reduzindo de ~6,30 EJ em 2025 para ~5,07-5,93 EJ devido à ganhos de eficiência, seja por medidas de eficiência energética ou por uma maior eletrificação nos setores, como indústria e transporte.

Os resultados dos modelos indicam que o setor energético brasileiro passa por uma transformação estrutural até 2050, com forte redução da participação de combustíveis fósseis e crescimento acelerado das fontes renováveis.

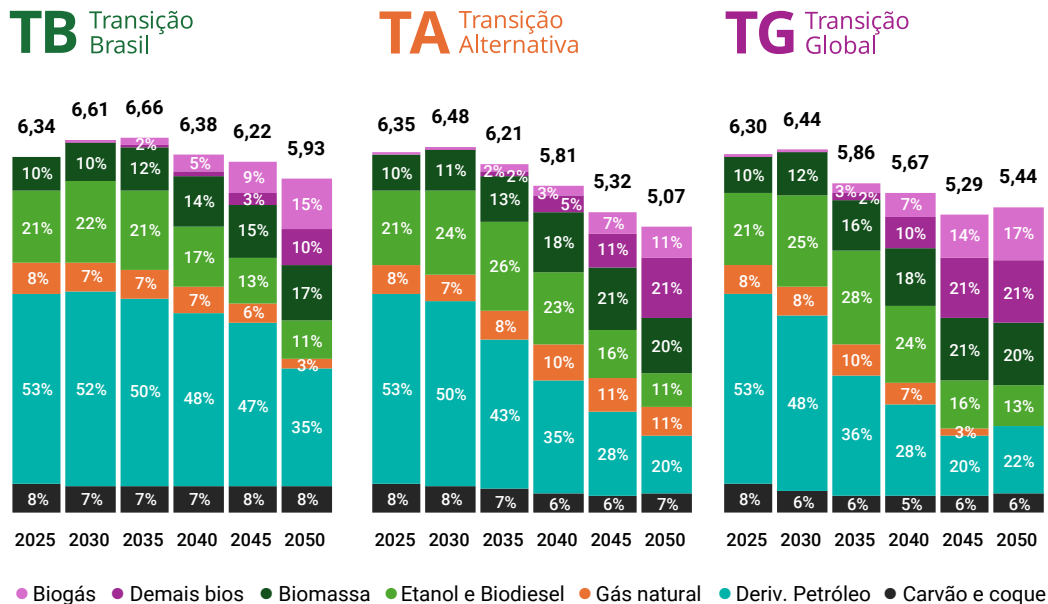
No Cenário TB, a participação de renováveis na oferta de energia primária sobe de cerca de 50% hoje para ~60% em 2050, enquanto petróleo e gás ainda representam aproximadamente 40%, mas com papel menos relevante e compensado por remoções de carbono.

No Cenário TA, as renováveis chegam a ~72% da matriz energética em 2050, com ênfase na bioenergia, eólica e solar. Além disso, neste cenário, há uma adição de ~4 GW de nova capacidade nuclear para compensar limitações, como as premissas de redução do fator de capacidade da geração hidrelétrica e da entrada anual de energia eólica²³.

No Cenário TG, a mudança é mais profunda: as renováveis alcançam ~80% da matriz energética em 2050, restando apenas cerca de 20% de fósseis — uma redução significativa do consumo doméstico de petróleo, gás e carvão, com quase toda a expansão de energia suprida por solar, eólica e bioenergia, além de maior participação de nuclear e CCUS/BECCS.

23. As limitações hidrelétricas e eólicas referem-se à premissa que simula a redução do fator de capacidade das UHEs e estabelece uma entrada anual limitada de projetos eólicos no início do horizonte, relativamente tímida diante do avanço da competitividade dos projetos solares fotovoltaicos.

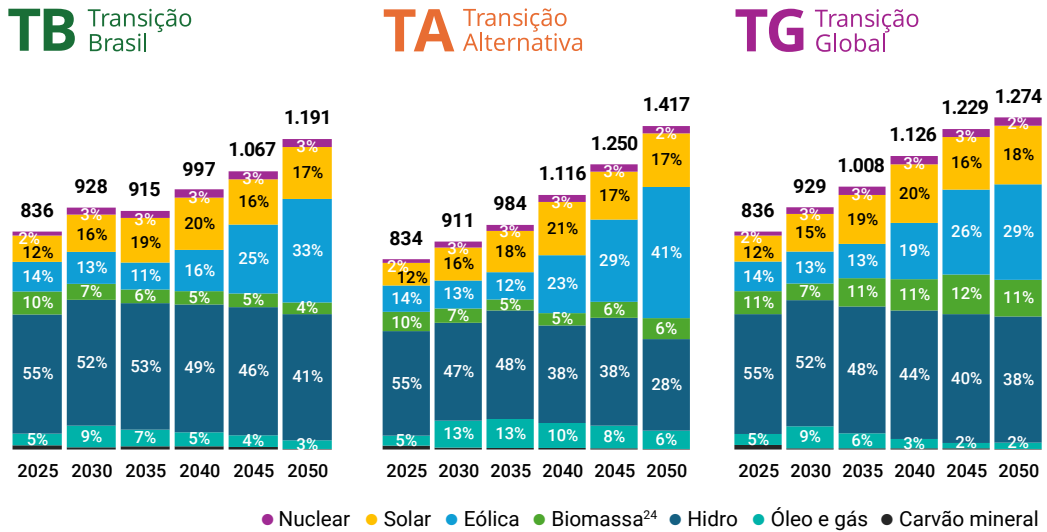
Gráfico 12. Consumo direto de combustíveis (EJ)



Setor Elétrico

Em todos os cenários, a geração elétrica se torna praticamente livre de emissões até 2050, com eólica e solar assumindo protagonismo: a eólica cresce de ~14% em 2025 para mais de 30% em 2050, e a solar aumenta significativamente sua participação. A hidroeletricidade mantém relevância, mas perde espaço relativo, e as termelétricas fósseis complementam a capacidade do sistema elétrico em momentos de reduzida disponibilidade das fontes renováveis. Esses resultados confirmam que o setor elétrico será o eixo central da descarbonização brasileira, combinando a queda do consumo de fósseis com a rápida expansão de renováveis modernas e novas tecnologias.

Gráfico 13. Geração Elétrica (TWh)



Curto Prazo (2025-2030):

Ações críticas que viabilizam a trajetória futura da transição energética brasileira

O período de 2025 a 2030 será marcado por ações estruturantes e investimentos maciços em energia eólica e solar fotovoltaica, fundamentais para sustentar a trajetória futura da transição energética no Brasil. Essa fase consolida as bases institucionais, tecnológicas e regulatórias que permitirão ao país transformar seu potencial renovável em vetor estratégico de desenvolvimento econômico e segurança energética.

Na energia **nuclear**, o foco recai sobre a construção de consenso político e social em torno do valor estratégico de fortalecer o complexo nuclear brasileiro, abrindo caminho para novos investimentos e planejamento de longo prazo. Supera-se o impasse histórico em torno da usina de Angra 3, cuja conclusão é prevista para o final da década de 2030, adicionando 1,4 GW de capacidade ao sistema elétrico. Paralelamente, ocorre o aperfeiçoamento do marco legal-regulatório, incorporando a participação de novos agentes e ampliando o ambiente de investimentos no setor.

24. Biomassa, aqui, refere-se a eletricidade gerada a partir do bagaço da cana-de-açúcar, reutilizado para queima e geração de vapor.

No setor **elétrico**, o avanço depende de uma sinalização de preços adequada, capaz de refletir os requisitos físico-operativos do sistema e incentivar a inserção de novas fontes de potência, flexibilidade e armazenamento. O período será marcado pela diversificação da matriz e pelo fortalecimento da competição, enfrentando desafios inerentes aos sistemas com participação crescente de recursos renováveis, eólico e solar, como o gerenciamento eficiente de momentos com excedentes de energia.. Ganha destaque o planejamento e a expansão das redes de transmissão e distribuição, com adoção de novas tecnologias, investimentos em adaptação e resiliência climática e integração de novos vetores de demanda, como *data centers* e *powershoring*. Ao mesmo tempo, novos parques eólicos no Nordeste e usinas solares distribuídas e centralizadas ampliam a oferta de energia limpa, enquanto medidas de eficiência energética e resposta da demanda – tanto técnicas quanto sistêmicas – começam a ser implementadas em escala.

No campo do **hidrogênio** de baixo carbono, o foco está na regulamentação e implementação do marco legal vigente, com destaque para o Sistema Brasileiro de Certificação, o Rehidro e o PHBC. O país avança na realização de projetos-piloto e demonstração, explorando rotas tecnológicas complementares em linha com o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2). Paralelamente, inicia-se a viabilização dos primeiros projetos em escala industrial, voltados tanto ao mercado doméstico quanto à exportação, com esforços concentrados na superação de barreiras de financiamento, *equity*, infraestrutura e gestão de riscos.

Por fim, no eixo de **biocombustíveis e remoção de carbono**, o Brasil dá início a um ambicioso programa de desenvolvimento de BECCS, com a meta de posicionar o país como líder global em bioenergia com captura e armazenamento de carbono. As refinarias nacionais passam a coprocessar óleos vegetais para a produção de combustíveis drop-in renováveis, enquanto se iniciam investimentos em projetos piloto de BECCS/CCS, sistemas de monitoramento geológico e plantas de demonstração, lançando as bases para uma economia de carbono negativo nas próximas décadas.

Médio Prazo (2030-2040):

Transformação estrutural da matriz energética brasileira

A década de 2030 marca o início da transformação estrutural da matriz energética nacional, consolidando o papel das fontes renováveis e de baixo carbono como pilares centrais do sistema. Nesse período, eólica, solar e bioenergia passam a ocupar uma fatia crescente da matriz, combinando expansão acelerada com maior integração tecnológica e territorial. Essa diversificação é acompanhada pela adoção em larga escala de sistemas de armazenamento de energia e resposta da demanda, que se tornam essenciais para lidar com a variabilidade das renováveis e garantir flexibilidade operativa ao sistema elétrico.

A produção de petróleo atinge seu ápice histórico no início do período, mas começa a declinar gradualmente na segunda metade da década, em linha com o processo global de transição e com a reorientação do investimento para energias limpas e tecnologias emergentes. Paralelamente, o país testemunha a entrada em operação das primeiras plantas comerciais de hidrogênio de baixo carbono, estrategicamente conectadas a polos industriais e portos, o que posiciona o Brasil na vanguarda da economia do hidrogênio e fortalece sua competitividade internacional em cadeias intensivas em energia.

Ao mesmo tempo, consumidores de alta intensidade energética, como mineração, siderurgia e petroquímica, passam a atuar como âncoras da expansão da infraestrutura elétrica, celebrando contratos de longo prazo e investimentos que viabilizam a construção de novos ativos de geração e transmissão. Essa cooperação entre setores público e privado redefine a lógica da expansão do sistema, combinando segurança energética, eficiência econômica e sustentabilidade ambiental.

Longo Prazo (2040-2050):

Consolidação de uma matriz energética alinhada à neutralidade de emissões

Entre 2040 e 2050, o Brasil consolida uma matriz energética essencialmente livre de carbono, alcançando mais de 97% de geração elétrica renovável. As fontes fósseis tornam-se residuais, restritas a usos difíceis de eletrificar, como certos segmentos da indústria pesada, aviação e navegação, onde ainda cumprem papel estratégico para a segurança energética e a complementação de potência em períodos de menor disponibilidade dos recursos renováveis.

O protagonismo da bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) se consolida, com usinas de etanol e biomassa gerando remoções líquidas de CO₂ que compensam as emissões fósseis e não-CO₂ remanescentes, neutralizando emissões de toda a economia. Esse movimento posiciona o Brasil como uma das poucas nações com matriz energética climaticamente positiva, capaz de remover mais carbono do que emite.

Ao longo da década, a geração solar perde participação relativa — consequência natural do fim da vida útil dos sistemas instalados nas décadas anteriores —, sendo substituída de forma mais eficiente e estável pela expansão eólica, impulsionada por ganhos tecnológicos e maior capacidade de armazenamento. Paralelamente, a infraestrutura elétrica é completamente modernizada e digitalizada, permitindo alto intercâmbio de energia entre regiões, integração plena da geração distribuída e o gerenciamento inteligente da demanda.

O ciclo se completa com a consolidação das biorrefinarias, que passam a operar de forma integrada, produzindo diesel verde, biobunker, SAF, GLP verde e nafta verde, fechando o elo entre energia, indústria e transportes. Assim, o país entra na segunda metade do século XXI com uma matriz energética robusta, resiliente e neutra em carbono, referência global de transição planejada e inclusiva.

Papel dos formuladores de políticas públicas

A transição energética brasileira depende de um arranjo regulatório moderno e pró-mercado, capaz de alinhar sinais econômicos à operação física do sistema e de escalar rotas tecnológicas (SAF, HVO, biometano, hidrogênio, BECCS/CCS e armazenamento). Isso requer mercados de eletricidade com preços e contratos que remunerem adequadamente os requisitos do sistema elétrico (potência, flexibilidade, serviços ancilares), pacotes regulatórios detalhados para novos combustíveis e vetores, e uma política industrial de energia que estimule produção local de equipamentos, P&D com metas mensuráveis e financiamento verde. Em paralelo, é essencial fortalecer resiliência e garantir transição justa, integrando hubs portuários/industriais, requalificação de trabalhadores e proteção tarifária a consumidores vulneráveis.

1. Aperfeiçoamento dos mercados de eletricidade

- Introduzir sinais horário-locacionais que valorizem flexibilidade.
- Aprimorar a gestão e a alocação de riscos sistêmicos (curtailment, congestionamentos, indisponibilidades de rede), com mecanismos transparentes e previsíveis para agentes e consumidores.
- Estruturar mecanismos de contratação de serviços (leilões/contratos) que acompanhem as necessidades e dinâmicas físico operativas do sistema elétrico.
- Estabelecer contratos que valorem os diferentes atributos das fontes, como a capacidade de suprimento firme e flexibilidade operativa, implementando mecanismos de mercado competitivos.
- Avaliar periodicamente os impactos tarifários da geração distribuída e encargos setoriais, garantindo estímulos à transição sem comprometer a modicidade tarifária.
- Racionalizar e reestruturar os subsídios no setor elétrico, com foco em eficiência e melhor alocação dos recursos.

2. Detalhar pacotes regulatórios, viabilizando o escalonamento das rotas de transição

- SAF, HVO, biocombustíveis marítimos e biometano, sobretudo para *hard-to-abate*, em linha com o marco legal da Lei Combustível do futuro.
- Promover coordenação regulatória entre ANEEL, ONS, CCEE e demais órgãos setoriais, assegurando coerência entre desenho de mercado, operação do sistema e expansão da infraestrutura.
- BECCS e outras rotas CCS para captura e remoções de CO₂ no setor energético.
- Hidrogênio de baixo carbono e seus derivados.
- Sistemas de armazenamento de energia em escala (baterias, usinas hidrelétricas reversíveis).

3. Política industrial e inovação em energia

- Integrar políticas públicas já existentes de diferentes níveis de governo, coordenando ações e ampliando a efetividade.
- Incentivar produção competitiva de aerogeradores, painéis, baterias e eletrolisadores (por exemplo, via programas análogos ao Programa Mover / BNDES).
- Promover a eficiência energética, otimizando o consumo energético em diferentes setores.

- Fomentar P&D compartilhado (hidrogênio, BECCS, CCS) com cláusula de resultado mensurável.
- Mobilizar financiamento até 2030 através de incentivos como green bonds, fundos climáticos, BID, BNDES) para transformar o hidrogênio de baixo carbono em realidade produtiva e atrair capital internacional.

4. Resiliência e transição justa

- Promover remuneração adequada para reservas operativas e serviços ancilares, integrando tecnologias complementares e com distintas características operativas.
- Capturar sinergias industriais com hubs de hidrogênio e CCS em zonas portuárias / petrolíferas, com requalificação de trabalhadores.
- Adaptar tarifas de energia para populações vulneráveis, com recursos da CDE e Fundo Clima.

Oportunidades para o setor privado

O setor energético brasileiro oferece um ambiente privilegiado para investimentos privados em geração renovável, infraestrutura elétrica e novos vetores de energia. A combinação de recurso natural abundante, demanda crescente por energia limpa e estrutura regulatória em evolução cria oportunidades únicas para empresas que queiram liderar a transição. Investimentos em eólica, solar, armazenamento e digitalização das redes se somam ao avanço dos combustíveis de baixo carbono, como HVO, SAF e hidrogênio, abrindo espaço para novos modelos de negócio e exportações. Além disso, há perspectivas promissoras em gestão integrada de carbono e finanças verdes, bem como no emergente mercado de *data centers* e *powershoring*. A realocação de atividades intensivas em energia através de estratégias de *powershoring* permitem que o Brasil ofereça acesso à energia renovável em larga escala com tarifas previsíveis e insumos essenciais com menos pegada de carbono, ampliando a competitividade global de produtos verdes (Instituto E+ Transição Energética, 2025b).

1. Geração renovável e infraestrutura elétrica

- Expansão contínua em energia eólica e solar.

- Disponibilidade de *Power Purchase Agreements* (PPA) corporativos de longo prazo com empresas buscando eletricidade 100% limpa.
- Investimento em transmissão, soluções de armazenamento (baterias utilitárias, hidroelétricas reversíveis) e serviços ancilares.
- Investimentos em digitalização, automação e expansão das redes (T&D) são essenciais para otimizar o fluxo de energia, minimizar perdas técnicas e reduzir o *curtailment*.
- Crescimento do armazenamento distribuído e oportunidades de gerenciamento de demanda em um sistema com participação crescente de geração renovável.

2. Combustíveis de baixo carbono

- Alta demanda doméstica e internacional por diesel HVO, SAF e nafta verde.
- Geração de créditos de carbono para projetos integrados de BECCS em plantas de etanol, HVO, SAF e outras rotas de biomassa e bioeletricidade.
- Potencial de exportação de biocombustíveis avançados e hidrogênio de baixo carbono, além do fornecimento doméstico a siderúrgicas, portos e aviação.

3. Portfólio integrado e gestão de carbono

- Direcionamento, pelas petroleiras, da geração de caixa dos fósseis para produção para renováveis ou outros usos, como petroquímica.
- Aproveitamento da expertise brasileira em reservatórios para CCS, inclusive para outros setores (indústria, BECCS).
- Expansão de instrumentos como *green bonds* e *sustainability-linked loans* permitindo uma redução do custo de capital ao atrelar investimentos a metas de expansão limpa e redução de emissões.

4. Data centers e powershoring

- Desenvolvimento de cadeias de valor energointensivas, com foco em exportação com vantagens comparativas, devido ao baixo custo de geração no Brasil e teor de renováveis.
- Processamento de grandes volumes de dados se tornam vantajosos, principalmente quando se trata de *datacenters* com cargas de trabalho que não são sensíveis à latência, como treinamento de modelos de IA, processamento de grandes volumes de dados (*big data*) e armazenamento.

4.4. Transportes



Principais achados quantitativos

Substituição gradual de fósseis por biocombustíveis,

complementada por eletrificação, que juntas correspondem a ~50%-70 do consumo total do setor de transportes.

Apesar da forte redução, a participação dos derivados de petróleo

permanece no setor de transportes: cai de ~67% em 2025 para ~30-53% em 2050, principalmente devido aos desafios de descarbonização dos modais marítimo e aéreo.

Ganhos expressivos de eficiência levam à redução do consumo

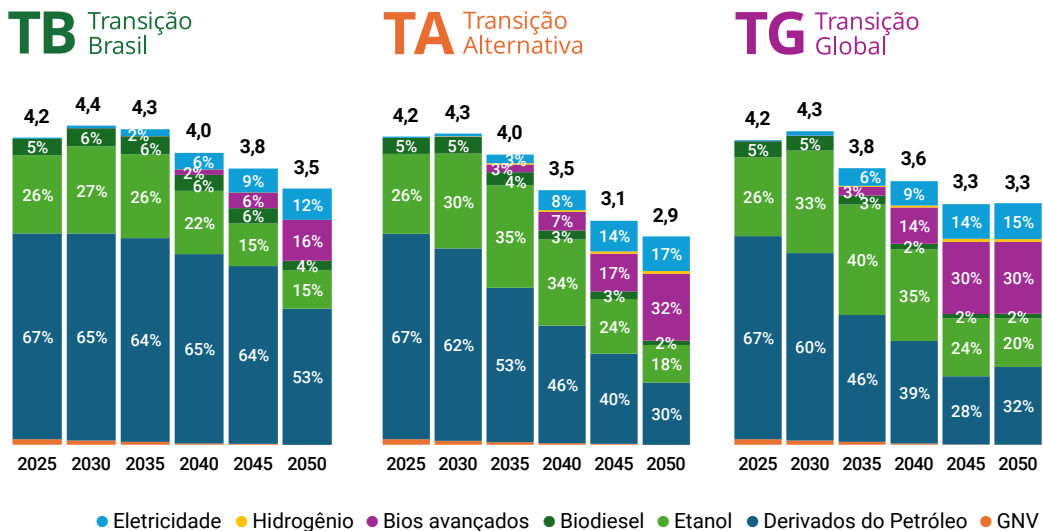
no setor, que cai de 4,2 EJ em 2025 para ~2,9-3,3 EJ em 2050.

O setor de transportes é hoje um dos maiores responsáveis pelas emissões de energia no Brasil e, ao mesmo tempo, um dos que mais demandará transformação para alinhar-se à neutralidade climática até 2050.

Em todos os cenários do PTE2, há uma tendência de forte queda nas emissões do setor, resultado da combinação entre maior participação de biocombustíveis avançados, eletrificação da frota e mudanças modais em direção a alternativas mais eficientes.

No Cenário Transição Brasil (TB), a trajetória de redução é significativa, mas gradual: as emissões caem de cerca de ~185 MtCO₂eq atualmente para ~105 MtCO₂eq em 2050, ainda com parcela relevante de combustíveis fósseis. O Cenário Transição Alternativa (TA) adiciona instrumentos como precificação de carbono e mandatos obrigatórios, antecipando a substituição de fósseis e permitindo alcançar reduções maiores que as do TG, mesmo diante de condicionantes climáticas e tecnológicas distintas do TB.

Gráfico 14. Consumo do Setor de Transportes (EJ)



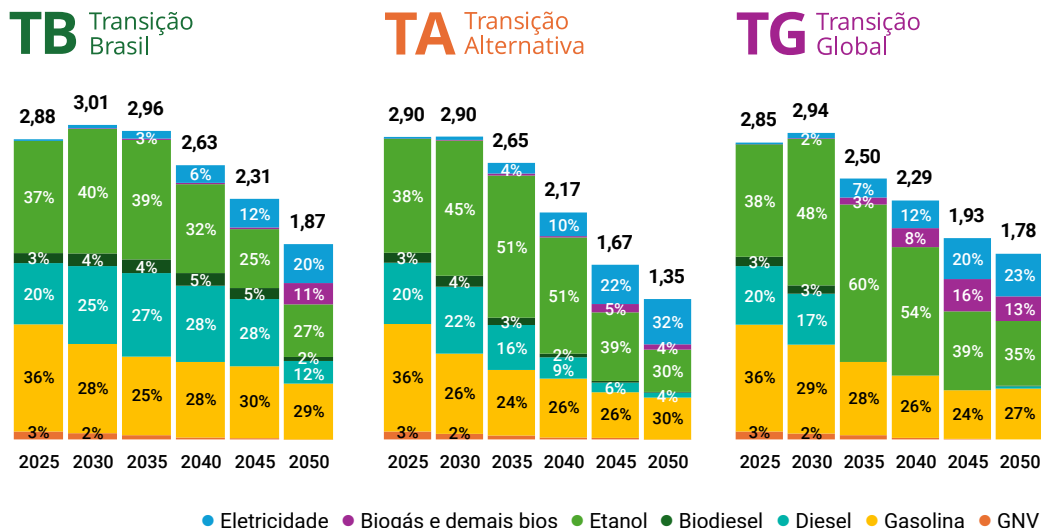
Esse processo envolve trajetórias específicas para cada modal – passageiros, cargas, aviação e transporte marítimo – que apresentam ritmos e desafios distintos. Nos próximos tópicos, detalham-se essas quatro dimensões, evidenciando os papéis complementares dos biocombustíveis sustentáveis, da eletrificação e das mudanças estruturais na logística para que o transporte brasileiro contribua de forma decisiva para a neutralidade climática.

Já no Cenário Transição Global (TG), em que o orçamento de carbono é mais restritivo, a queda é mais rápida e profunda, com quase toda a frota urbana eletrificada antes de 2050 e emissões próximas de 65 MtCO₂eq.

A utilização da bioenergia no setor de transportes se dá pela competitividade frente às alternativas de descarbonização, além de ser uma solução de otimização sistêmica no contexto de descarbonização da economia. Permite substituir combustíveis líquidos como nafta petroquímica ou GLP e compensar emissões de GEE de setores de difícil abatimento, como aviação, transporte marítimo e transporte de carga a longa distância. A escolha pelos biocombustíveis avançados *drop-in* também permite o uso da infraestrutura existente para transporte e distribuição dos combustíveis, além do aproveitamento e uso direto na frota de veículos.

Transporte de Passageiros

Gráfico 15. Consumo Transporte de Passageiros (EJ)



Curto Prazo (2025-2030):

Arrancada da transição para uma mobilidade de baixo carbono

Na década de 2030, o transporte de passageiros entra em uma fase de queda inicial da participação de combustíveis fósseis, puxado pela ampliação de biocombustíveis como etanol e biodiesel, com forte presença de veículos flex entre os modelos com motor a combustão. Nesse período, acelera-se também o escalonamento da eletrificação, com aumento expressivo da participação dos veículos elétricos no serviço de transporte leve. A venda de veículos elétricos (EVs) passa a representar parcela significativa do mercado automotivo nacional, impulsionada por avanços tecnológicos, queda de custos das baterias e políticas de incentivo à renovação da frota.

Em paralelo, ocorre um crescimento robusto da infraestrutura de carregamento, com expansão de pontos públicos e privados de recarga, tanto em áreas urbanas quanto em corredores logísticos de longa distância, garantindo maior conveniência e segurança energética para os usuários. O processo é acompanhado por incentivos ao uso de energia renovável para atender à crescente demanda elétrica do se-

tor, assegurando que a eletrificação ocorra de forma ambientalmente sustentável e alinhada à trajetória nacional de neutralidade de emissões.

Esse período consolida o amadurecimento do ecossistema da mobilidade elétrica, no qual indústria, setor elétrico e políticas públicas convergem para sustentar uma transição tecnológica em escala.

Médio Prazo (2030-2040):

Escalonamento da eletrificação e forte participação de biocombustíveis

Entre 2030 e 2040, a participação de biocombustíveis mantém-se relevante no transporte de passageiros em todos os cenários. A produção dos biocombustíveis se beneficia da economia de escopo, uma vez que a produção dos combustíveis verdes ocorre de forma conjunta, a produção do diesel verde traz consigo a produção de querosene, gasolina e óleo pesado verdes. Ao mesmo tempo, a eletrificação do transporte de passageiros avança de forma consistente, ampliando sua contribuição no serviço de transporte leve em todo o país. A participação dos veículos elétricos (EVs) cresce de maneira acelerada nas novas vendas, consolidando-se como uma das principais opções tecnológicas para a mobilidade urbana e interurbana.

Paralelamente, há uma expansão significativa da infraestrutura de carregamento, com aumento da disponibilidade de pontos de recarga em áreas residenciais, comerciais e rodoviárias, garantindo maior conveniência e confiabilidade para os usuários. Esse movimento é sustentado por incentivos ao uso de energia renovável na matriz elétrica, assegurando que o avanço da eletrificação ocorra de forma ambientalmente sustentável e alinhada aos objetivos nacionais de descarbonização.

Assim, o período representa o amadurecimento da transição para a mobilidade elétrica, consolidando as bases para uma frota de transporte cada vez mais limpa, eficiente e integrada à matriz energética de baixo carbono.

Longo Prazo (2040-2050):

Consolidação rumo à neutralidade

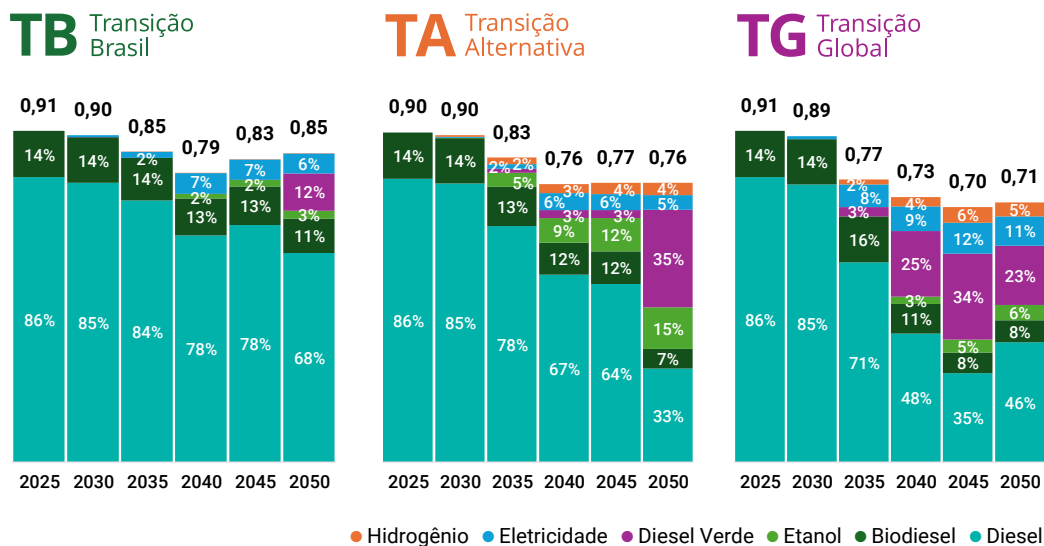
Entre 2040 e 2050, o transporte de passageiros consolida sua trajetória rumo à neutralidade de emissões, com uma redução significativa da participação dos combustíveis fósseis na matriz de mobilidade. O mix energético do setor passa a ser

dominado por biocombustíveis, combustíveis avançados e eletricidade, refletindo a maturidade tecnológica e a integração entre políticas de transporte, energia e clima.

A eficiência energética proporcionada pela motorização elétrica, combinada ao uso ampliado de fontes renováveis, torna-se o eixo central da estratégia de mitigação setorial, garantindo uma mobilidade mais limpa, acessível e sustentável. Com isso, o país atinge uma estrutura de transporte de passageiros alinhada aos compromissos de neutralidade climática, consolidando o papel da eletrificação e dos biocombustíveis como pilares da transição energética brasileira.

Transporte de Cargas

Gráfico 16. Consumo Transporte de Cargas (EJ)



Curto Prazo (2025-2030):

Apesar da difícil eletrificação, ocorrem mudanças iniciais

Entre 2025 e 2030, apesar da forte presença de combustíveis fósseis, o transporte de cargas inicia mudanças graduais em direção à descarbonização. Nesse período, os fabricantes passam a lançar caminhões híbridos e elétricos, voltados principal-

mente para operações urbanas e de curtas distâncias, onde a viabilidade técnica e econômica é mais favorável.

O teor de biodiesel é mantido em B15, mas com flexibilização para a incorporação de blends de diesel verde, ampliando o teor renovável do combustível e reduzindo as emissões da frota a combustão. Paralelamente, há ganhos de eficiência logística proporcionados por melhorias na infraestrutura de transportes, como pavimentação de corredores estratégicos, modernização de terminais intermodais e otimização de rotas de escoamento, que contribuem para reduzir o consumo de energia e as emissões associadas ao transporte rodoviário de cargas (Santos et al.,2024).

Médio Prazo (2030-2040):

Avanço em múltiplas frentes

Entre 2030 e 2040, o transporte de cargas avança em diversas frentes tecnológicas e logísticas, consolidando os primeiros resultados estruturais da transição energética no setor. Nesse período, há uma ampliação do uso de biodiesel, bem como projetos-piloto de caminhões movidos a célula a combustível de etanol e hidrogênio, que começam a ser implementados em rotas de média e longa distância, testando novas soluções para reduzir as emissões do transporte pesado.

A logística nacional torna-se mais eficiente, com a ampliação da participação da malha ferroviária no serviço de frete, reduzindo custos, emissões e a dependência do modal rodoviário. Nos centros urbanos, os veículos urbanos de carga (VUCs) elétricos ganham relevância, consolidando-se como alternativa de baixo carbono para entregas de curta distância até o final da década.

Paralelamente, a produção de diesel verde entra em fase de expansão, alcançando escala industrial e diversificando o suprimento de combustíveis sustentáveis, o que fortalece a segurança energética e reduz a intensidade de carbono no transporte de cargas em todo o país.

Longo Prazo (2040-2050):

Difusão comercial de novas tecnologias

Entre 2040 e 2050, o transporte de cargas alcança uma fase de difusão comercial das tecnologias de baixo carbono, consolidando a transição iniciada nas décadas

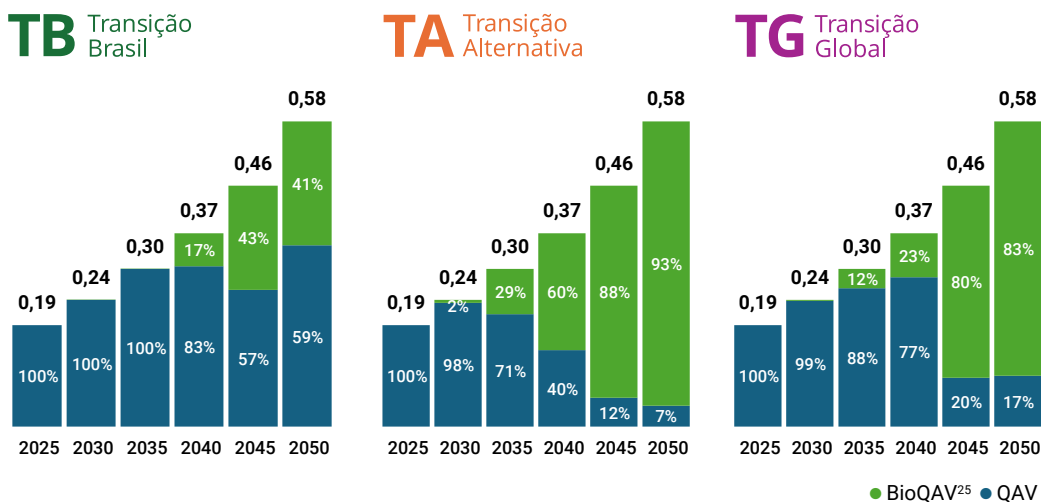
anteriores. Apesar de a demanda energética do setor crescer em ritmo superior aos ganhos de eficiência, impulsionada pelo aumento do PIB e da atividade econômica, a penetração ampla de combustíveis alternativos garante a continuidade da redução da intensidade de emissões.

Os biocombustíveis – incluindo diesel verde, biodiesel e etanol – atingem cerca de 26% de teor renovável no consumo total do setor, refletindo o amadurecimento tecnológico e regulatório da cadeia produtiva. Paralelamente, ocorre uma reestruturação da matriz nacional de transportes, com migração progressiva das cargas para modais de alta capacidade e baixa emissão, como hidrovias, ferrovias e cabotagem, adequando cada modalidade ao perfil da carga e priorizando a eficiência logística.

Esse processo consolida um sistema de transporte de cargas mais integrado, eficiente e de menor pegada de carbono, posicionando o Brasil entre as principais economias emergentes na transição para a logística sustentável.

Transporte Aéreo

Gráfico 17. Consumo Transporte Aéreo (EJ)



25. BioQAV refere-se ao agregado de rotas de biocombustíveis para aviação (p.ex. HEFA, ATJ, etc) elencadas no PTE1. Transporte aéreo contempla consumo energético no território nacional (vôos domésticos e internacionais).

Curto Prazo (2025-2030):

SAF incipiente, mas com esforços em P&D

Entre 2025 e 2030, o uso de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) ainda se encontra em estágio incipiente, mas o período é marcado por avanços concretos em pesquisa, desenvolvimento e regulação. São realizados voos demonstrativos e comerciais com BioQAV, validando tecnologias e rotas de produção compatíveis com a infraestrutura existente e os padrões internacionais de segurança.

Paralelamente, ocorre a preparação de regulamentações específicas voltadas ao atendimento das metas de redução de emissões futuras, criando as bases para a expansão sustentável do setor aéreo. Durante essa fase, são também estabelecidos marcos regulatórios importantes, como metas e instrumentos previstos na Lei do “Combustível do Futuro” e no ProBioQAV, que estruturam o arcabouço jurídico e operacional necessário para o desenvolvimento do mercado nacional de SAF.

Médio Prazo (2030-2040):

Pavimentação do caminho pós-2040

Entre 2030 e 2040, o setor de transporte aéreo entra em uma fase de implementação efetiva das políticas de descarbonização, pavimentando o caminho para a transição plena nas décadas seguintes. As metas de redução da intensidade de carbono na aviação, estabelecidas pelo ProBioQAV, passam a entrar em vigor no final da década, determinando que o conteúdo de SAF proporcione reduções de 10% a 20% nas emissões em comparação ao querosene de aviação (QAV) convencional.

Essa etapa representa o amadurecimento do mercado nacional de SAF, com ampliação gradual da oferta, fortalecimento das cadeias produtivas e consolidação da base regulatória que sustentará a expansão comercial no longo prazo.

Longo Prazo (2040-2050):

Aceleração da adoção de SAF

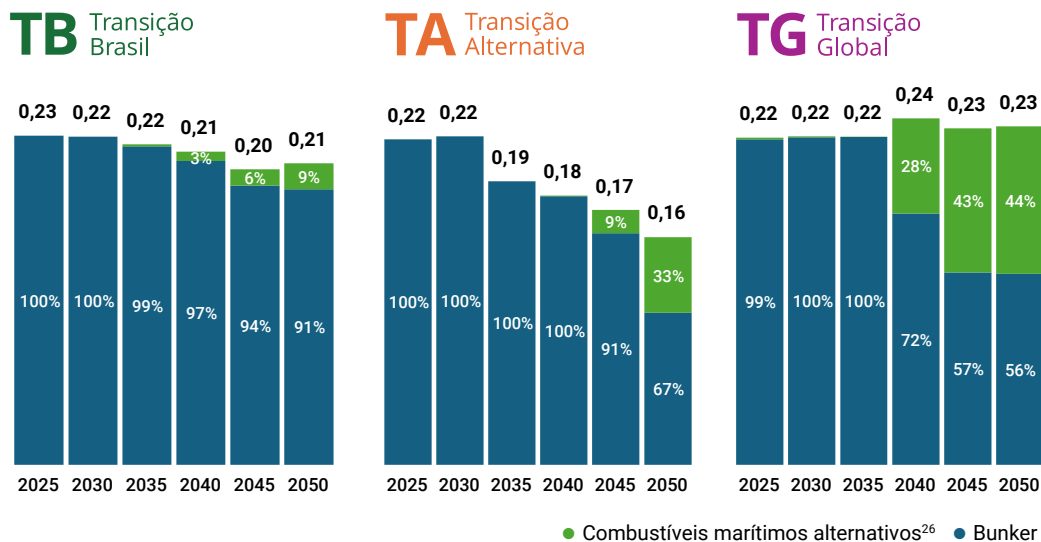
Entre 2040 e 2050, o Brasil consolida-se como hub regional de produção e exportação de Combustível Sustentável de Aviação (SAF), atraindo investimentos significativos em infraestrutura e capacidade industrial. O país se destaca como fornecedor estratégico para o mercado latino-americano e para rotas internacionais de baixo car-

bono, aproveitando seu potencial em biomassa e tecnologias avançadas de refino.

Apesar dos avanços, ainda persiste uma prevalência do querosene fóssil (QAV) em parte do abastecimento, com compensações de emissões sendo utilizadas para equilibrar o balanço climático do setor. No entanto, o crescimento acelerado da demanda por SAF no final da década começa a esbarrar na limitação da capacidade produtiva de BioQAV, evidenciando a necessidade de novos investimentos, diversificação de rotas tecnológicas e políticas de estímulo à expansão da oferta doméstica.

Transporte Marítimo

Gráfico 18. Consumo Transporte Marítimo (EJ)



26. Combustíveis marítimos alternativos incluem, p.ex., Biobunker, Biometanol, eH2 fuels, metanol, biodiesel e etanol, conforme elencado no PTE1, com premissas do PTE2.

Curto Prazo (2025-2030):

Maior eficiência e uso inicial de biocombustíveis

Entre 2025 e 2030, o transporte marítimo brasileiro inicia sua trajetória de descarbonização com foco em ganhos de eficiência operacional e na introdução inicial de biocombustíveis. Nesse período, são implementados os primeiros projetos-piloto de uso de blends com biocombustíveis na cabotagem, ainda com impacto limitado sobre o consumo total de combustíveis do setor, mas fundamentais para validar tecnologias e rotas de suprimento.

Simultaneamente, o aumento da eficiência das embarcações — impulsionado por melhorias no design, manutenção e gestão de motores — contribui para reduzir o consumo energético no curto prazo. Além disso, avança a otimização de rotas, operações e logística portuária, apoiada por Programas de Descarbonização de Portos, que promovem o uso racional de energia, reduzem tempos de atracação e introduzem práticas sustentáveis na gestão portuária (CEBRI, 2024).

Médio Prazo (2030-2040):

Operação experimental

Entre 2030 e 2040, o transporte marítimo entra em uma fase de operações experimentais com combustíveis de baixo carbono, marcada pelo escalonamento gradual do uso de biobunkers avançados nas rotas de cabotagem e nos principais portos brasileiros. Esse movimento é acompanhado por investimentos em infraestrutura portuária, com tanques e sistemas logísticos dedicados ao abastecimento renovável, integrados a polos de produção de HVO e SAF, o que permite o desenvolvimento de cadeias de suprimento mais limpas e eficientes.

Nesse período, navios demonstradores equipados com motores *dual-fuel* — capazes de operar com bunker tradicional e metanol verde — iniciam suas rotas de longo curso, testando novas tecnologias e modelos operacionais que pavimentam o caminho para a descarbonização do transporte marítimo em larga escala nas décadas seguintes.

Longo Prazo (2040-2050): Substituição gradual por biobunker

Entre 2040 e 2050, o transporte marítimo avança para a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por biobunker e outros combustíveis marítimos verdes, consolidando o papel do Brasil como usuário e fornecedor regional dessas soluções sustentáveis. A infraestrutura portuária modernizada e integrada aos polos de biocombustíveis permite o abastecimento regular de embarcações com combustíveis renováveis, fortalecendo a competitividade e a segurança energética do setor.

Nesse período, o metanol verde começa a abastecer navios de grande porte, representando um complemento crescente ao biobunker nas rotas internacionais. Embora ainda em fase de expansão, sua adoção sinaliza a diversificação tecnológica e o avanço rumo à descarbonização completa da navegação brasileira.

Papel dos formuladores de políticas públicas

A transição para um sistema de transporte de baixo carbono exige políticas públicas coordenadas, ambiciosas e tecnologicamente neutras, capazes de acelerar a modernização da frota e diversificar os vetores energéticos. Cabe ao Estado fomentar a cadeia de biocombustíveis avançados, estimular a eletrificação em segmentos estratégicos, e expandir o transporte público e os modais ferroviário e hidroviário, reduzindo a dependência do rodoviário. Ao mesmo tempo, normas de eficiência energética, inspeção e renovação de frota devem alinhar o mercado doméstico aos padrões internacionais, garantindo ganhos ambientais, produtividade logística e segurança energética.

1. Fomentar a cadeia de biocombustíveis avançados

- Fortalecer programas como o RenovaBio e Combustível do Futuro, revendo e aumentando gradualmente mandatos após 2030 (HVO, SAF, biogás e etanol 2G).
- Aplicar as diretrizes estabelecidas no Combustível do Futuro.
- Desenvolver testes e certificação de biodiesel em navios, alinhadas aos padrões e certificações globais.

- Promover projetos de hidrogênio de baixo carbono com medidas do Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Lei 14.990/2024) e ampliar hubs portuários no NE/Norte.

2. Acelerar a eletrificação veicular em nichos-chave

- Fomentar o desenvolvimento e a expansão do mercado de veículos de baixa e zero emissão no país – coerentes com o Programa Mover (incentivos industriais e metas de eficiência veicular).
- Expandir a infraestrutura de recarga, incluindo um plano nacional de pontos de recarga rápida em corredores rodoviários e áreas urbanas.

3. Expandir transporte público e malha ferro-hidroviária

- Acelerar projetos ferroviários estratégicos e melhorar hidrovias, com foco em corredores de exportação e conexões inter-regionais, reduzindo a dependência do modal rodoviário de longo curso.

4. Normas de eficiência e renovação de frota

- Introduzir metas de consumo/CO₂, alinhadas às melhores práticas internacionais.
- Retomar programas de inspeção veicular ambiental e segurança.
- Viabilizar um programa de renovação de frota de caminhões antigos (para troca por modelos mais novos e eficientes, incluindo opções a gás, híbridas ou elétricas).

Oportunidades para o setor privado

A mudança dos vetores energéticos e da logística abre janelas claras de investimento para o setor privado: biocombustíveis avançados e hidrogênio com reaproveitamento de infraestrutura existente; eletromobilidade e uma nova cadeia automotiva local; terminais e corredores verdes com eletrificação e contratos de logística limpa; além de serviços digitais (roteirização, IA, MaaS) que reduzem custos e emissões. Aliado ao alinhamento a padrões internacionais (IMO/ICAO), esse movimento habilita escala produtiva, acesso a capital verde e inserção competitiva em mercados externos.

1. Biocombustíveis e novos combustíveis

- Viabilização da construção e ampliação de plantas de HVO e SAF devido ao aumento da demanda.
- Expansão de projetos de biometano que possuem duplo benefício (energia e gestão de resíduos em aterros, granjas e canaviais) e podem também gerar créditos de carbono.
- Construção de hubs de hidrogênio nos portos ou em corredores logísticos.
- Reaproveitamento da infraestrutura existente, impulsionando o uso de biocombustíveis *drop-in* a fim de reduzir externalidades econômicas – beneficiando-se da logística atual, exigindo menores custos de adaptação.

2. Eletromobilidade e cadeia automotiva do futuro

- Fabricação local de componentes (chassis modulares para ônibus elétricos, inversores, estações de recarga rápidas), montagem de veículos ou parceria com novas montadoras de VEs que queiram se instalar no Brasil para atender mercado interno e exportação.
- Desenvolvimento de startups de mobilidade elétrica compartilhada e servi-tização.

3. Infraestrutura e logística verde

- Modernização dos terminais de carga intermodais com eletrificação de guindastes, veículos de pátio elétricos.
- Concessão de prêmios a contratos de logística limpa por grandes embarcadores buscando reduzir a pegada de carbono das suas cadeias de suprimento.
- Aumento de emissão de títulos verdes por companhias aéreas que financiem SAF ou por armadoras que encomendem navios *dual-fuel* de nova geração.

4. Serviços digitais e novos modelos de negócio

- Expansão de plataformas de roteirização eficiente, otimização de carga (*freight matching*) e gestão de frotas por IA.
- Desenvolvimento de startups de *logtech* e *mobtech* que melhorem a eficiência logística e reduzam viagens ociosas com duplo benefício: redução de emissões e custos, gerando valor.
- Crescimento de modelos de *Mobility as a Service* (MaaS) nas cidades – aplicativos integrando diversos modos e pagamento unificado.

5. Inserção competitiva no mercado internacional

- Aproveitamento da participação ativa do Brasil na regulação internacional em órgãos como IMO/ICAO.
- Exploração de vantagens competitivas do país (biomassa e eletricidade renovável) para produção de combustíveis sustentáveis na aviação e no transporte marítimo.
- Alinhamento a padrões internacionais na produção de combustíveis alternativos, fomentando a diversidade de soluções em vias de expandir a produção e reduzir custos.

4.5. Cidades (residências, comercial e público)



Principais achados quantitativos

A eletricidade domina o consumo energético nas edificações, aumentando sua participação de cerca de 85% em 2025 para mais de 90% em 2050 em todos os cenários.

O consumo total em edificações cresce em todos os cenários, saindo de 2,6 EJ em 2025 para ~ 4,7 em 2050.

O uso de gás natural fóssil reduz sua participação ao longo do tempo, caindo de aproximadamente ~13% em 2025 para entre ~1%-4% em 2050, enquanto o gás verde (GLP e GN verde) e a biomassa passam a representar uma fração do consumo total.

Os cenários indicam que as cidades brasileiras podem reduzir substancialmente suas emissões até 2050 por meio da eletrificação de usos finais e de ganhos de eficiência energética em edificações.

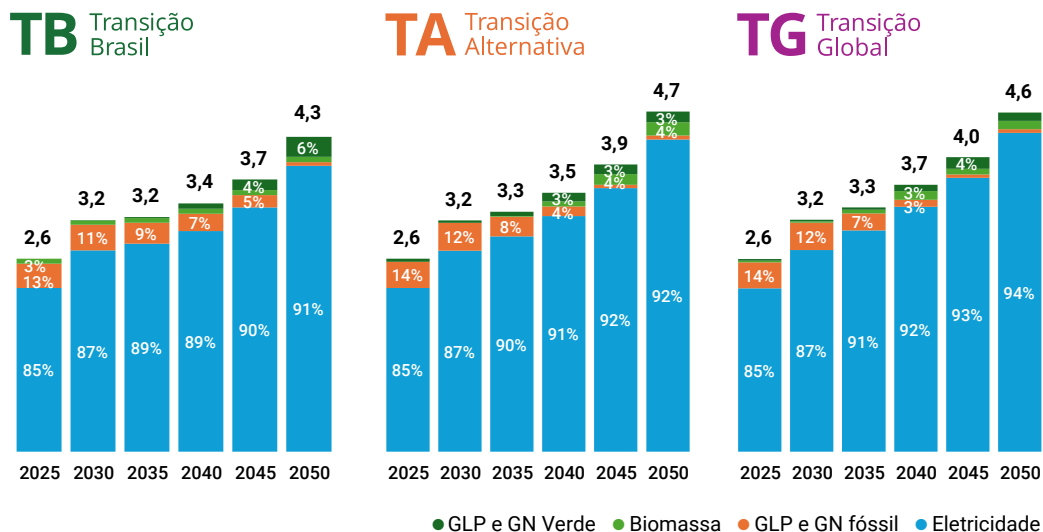
No Cenário TB, a demanda por eletricidade no setor residencial e comercial cresce de forma significativa, mas é atendida quase integralmente por fontes renováveis. Com isso, mesmo com o aumento do uso de climatização e eletrodomésticos, as

emissões urbanas diretas caem para ~3 MtCO₂eq em 2050, frente a mais de 20 MtCO₂eq hoje.

No Cenário TA, restrições hídricas e maior demanda elétrica decorrente de mudanças climáticas elevam o consumo de energia em cerca de 7% em relação ao TB (conforme premissas estabelecidas para o cenário TA), mas políticas de eficiência e incentivos à eletrificação garantem emissões finais próximas de 6 MtCO₂eq em 2050. Esses resultados demonstram que a transição energética urbana é viável e depende sobretudo de padrões construtivos mais eficientes, substituição de equipamentos a gás por elétricos e expansão da geração renovável distribuída.

No Cenário TG, as reduções são ainda mais intensas: praticamente todos os usos energéticos em edificações – como aquecimento de água e cocção – são eletrificados até 2050, com integração de biogás, resultando em emissões a níveis residuais próximos de zero.

Gráfico 19. Consumo Edificações (EJ)



Curto Prazo (2025-2030):

Eficiência e primeiros ganhos nas cidades

Entre 2025 e 2030, as cidades brasileiras iniciam uma transformação voltada à eficiência energética e à eletrificação dos usos finais, estabelecendo as bases para uma matriz urbana mais limpa e moderna. Nesse período, ocorre a adoção em massa de equipamentos mais eficientes em residências e estabelecimentos comerciais – como lâmpadas LED e aparelhos de ar-condicionado tipo inverter –, impulsionada por programas de certificação e etiquetagem de eficiência que orientam o consumo consciente e reduzem a demanda elétrica.

Começa também a substituição de equipamentos a combustíveis fósseis por alternativas elétricas, com destaque para o fogão de indução e o aquecedor solar em residências, além da introdução de bombas de calor para aquecimento de água em hotéis e edifícios de alto padrão, ampliando a eficiência térmica dos sistemas urbanos. Paralelamente, observa-se uma expansão exponencial da geração distribuída solar, com forte adesão de consumidores residenciais e comerciais, consolidando um movimento de protagonismo do consumidor na transição energética das cidades.

Médio Prazo (2030-2040):

Difusão massiva da eficiência e eletrificação urbana

Entre 2030 e 2040, as cidades brasileiras entram em uma fase de aceleração decisiva da transição energética, marcada pela elevação dos padrões de eficiência e pela modernização da infraestrutura urbana. Nesse período, são incorporadas normas obrigatórias de desempenho energético para edifícios novos, enquanto um grande esforço de retrofit é realizado em edificações existentes, com prioridade para prédios públicos de grande porte, como escolas, hospitais e repartições administrativas. Essas medidas reduzem significativamente o consumo de energia e as emissões associadas ao ambiente construído.

Em paralelo, ocorre a eliminação quase total dos fogões a GLP e das caldeiras a gás utilizadas para aquecimento, substituídas por soluções elétricas e sistemas mais eficientes, como bombas de calor. No campo da mobilidade, as redes de metrô, VLT (Veículo Leve sobre Trilhos) e BRT (*Bus Rapid Transit*) passam por expansões significativas, enquanto a eletrificação em massa das frotas de ônibus urbanos rede-

fine o transporte público, reduzindo emissões e poluição local. Ao mesmo tempo, são implementadas restrições progressivas ao transporte individual motorizado, priorizando sistemas coletivos e sustentáveis de deslocamento, em linha com os objetivos de neutralidade climática e qualidade de vida urbana.

Longo Prazo (2040-2050):

Cidades inteligentes e carbono neutro

Entre 2040 e 2050, as cidades brasileiras alcançam um alto grau de descarbonização, consolidando uma matriz energética urbana majoritariamente renovável. A eletrificação ampla dos usos estacionários – como climatização, cocção e aquecimento de água – torna-se a norma, reduzindo drasticamente o consumo de combustíveis fósseis. Ainda persiste uso pontual de GLP ou gás natural em algumas localidades, mas em proporções residuais e controladas.

As redes inteligentes passam a integrar plenamente os recursos energéticos distribuídos, permitindo um consumo urbano mais eficiente, flexível e resiliente. A eletricidade de origem renovável cobre mais de 90% da demanda final de energia urbana, sustentando uma infraestrutura energética limpa e digitalizada.

Paralelamente, multiplicam-se os bairros sustentáveis, planejados com soluções circulares que promovem uma gestão integrada e eficiente de energia, água e resíduos, simbolizando o amadurecimento da transição urbana rumo à neutralidade de carbono e à resiliência climática.

Papel dos formuladores de políticas públicas

A transição urbana para uma economia de baixo carbono depende de políticas públicas integradas que unam eficiência energética, eletrificação, gestão de resíduos e infraestrutura inteligente. Governos locais e nacionais devem fortalecer normas de desempenho para edificações, promover aparelhos eficientes e habitação social sustentável, e integrar energia, saneamento e resíduos nos planos diretores. Além disso, o avanço de cidades inteligentes – com redes elétricas digitais, tarifas horárias e geração distribuída – será essencial para tornar o consumo urbano mais eficiente, resiliente e acessível, conectando sustentabilidade ambiental e inclusão social.

1. Desenvolver políticas de eficiência para edificações

- Fortalecer programas de etiquetagem e implementar normas obrigatórias para novas edificações.
- Criar políticas (ISS²⁷, IPTU²⁸ verde) e linhas de financiamento para retrofit em prédios existentes.
- Capacitar e certificar mão de obra em construções verdes, garantindo que construtoras e síndicos disponham de conhecimento para adotar as medidas.
- Integrar requisitos de eficiência energética, eletrificação e uso de energias renováveis nos códigos de obras e planos diretores urbanos.

2. Promoção de aparelhos eficientes e eletrificação residencial

- Estimular a eletrificação e a utilização de fontes energéticas de baixa emissão de carbono para usos térmicos (exemplo, remover gradualmente subsídios ao GLP e estimular a aquisição de fogões elétricos e aquecedores solares).
- Integrar políticas sociais: expansão do Minha Casa Minha Vida Verde, incluindo sistemas solares térmicos e projetos de eficiência nas moradias populares.
- Garantir a confiabilidade do sistema elétrico frente à nova demanda.

3. Gestão de resíduos e bioenergia urbana

- Integrar resíduos, saneamento e energia nos planos diretores, gerando sinergias com geração distribuída e reduzindo custos de disposição final.
- Incentivar unidades de biodigestão distribuída (resíduos orgânicos de feiras, restaurantes, mercados), integrando economia circular.
- Estabelecer metas de desvio de resíduos orgânicos dos aterros para plantas de compostagem ou *waste-to-energy*.

4. Cidades inteligentes e infraestrutura urbana

- Desenvolver projetos-piloto de redes inteligentes, com sistemas de gestão de energia em tempo real.
- Regulamentar e fomentar tarifas horárias e programas de resposta da demanda para consumidores urbanos.
- Facilitar a disseminação de geração distribuída e armazenamento.
- Aproveitar sinergias setoriais (ex: biogás em aterros sanitários).

27. ISS: Imposto Sobre Serviços

28. IPTU: Imposto Predial e Territorial Urbano

Oportunidades para o setor privado

1. Geração distribuída (GD) e armazenamento

- Oferta de serviços de aluguel/*leasing* de painéis solares para quem não quer investir antecipadamente.
- Desenvolvimento de projetos de *solar community* (geração compartilhada) e rotas inovadoras (telhas solares, fachadas fotovoltaicas).
- Oferta de baterias residenciais ou para comércios, agregando valor via *backup* e economia em tarifa associada à GD.
- Permitir a agregação de sistemas de GD e baterias para prestação de serviços ao sistema elétrico, como resposta da demanda e suporte de flexibilidade.

2. Infraestrutura urbana e mobilidade elétrica

- Expansão de redes de carregamento rápido urbanos (parcerias com shoppings, mercados, estacionamentos) e soluções de recarga em condomínios e frotas.
- Disponibilidade de serviços de compartilhamento de veículos elétricos, *e-bikes* e *e-scooters*.
- Estabelecimento de *joint ventures* para produzir localmente componentes para veículos (baterias, sistemas de tração).

3. Competitividade e acesso a mercados

- Geração de vantagem comercial e valorização de mercado de empresas que se adequarem a possíveis barreiras de carbono (como o CBAM europeu).
- Atendimento a exigências de compradores globais pode garantir prêmio de preço e preferência.

5

Impactos macroeconômicos, setoriais e regionais

Principais achados quantitativos

Transição energética pode acelerar o crescimento do PIB acima da média histórica (entre 2% e 2,5%), alcançando um crescimento médio (2025-2050) de ~2,8% - 3,2 a.a.

A geração de empregos pode variar entre 846 mil e 1 milhão de vagas por ano no período de 2025 a 2050.

Sem política industrial regional, desigualdades persistem e limitam os ganhos da transição. Apesar do crescimento anual do PIB entre 2025 e 2050 ser similar entre regiões — Norte e Centro-Oeste a ~3,2%, Nordeste e Sul a ~3% e Sudeste a ~2,9% —, a renda per capita do Centro-Sul permanece muito superior à do Norte e Nordeste. Em 2050, a renda média per capita do Nordeste, ajustada a preços constantes, ainda será inferior à renda per capita média do Sudeste, Centro-Oeste e Sul em 2025.

Se bem conduzida, a transição energética pode ser um motor de desenvolvimento econômico e social para o Brasil. Os cenários indicam que há um caminho de ganhos mútuos (“win-win”): modernização econômica com geração de empregos e aumento de renda média, ao mesmo tempo em que atingimos as metas climáticas. Contudo, a despeito da transição energética gerar estímulos importantes ao crescimento das regiões menos desenvolvidas do país, notadamente o Nordeste e Norte, as participações das macrorregiões na economia não se alteram significativamente.

Para transformar a transição energética em efetivo aproveitamento das oportunidades de expansão da atividade econômica, é crucial antecipar tendências – preparando força de trabalho, atraindo investimentos e adaptando políticas econômicas (e de P&D) – de modo que o crescimento verde não seja obstaculizado por gargalos estruturais.

Crescimento do PIB e Investimentos

No Cenário TB, projeta-se um crescimento médio do PIB em torno de 3,0% ao ano entre 2025 e 2050, uma taxa superior à média histórica dos últimos 28 anos (2,3% a.a.²⁹), impulsionado por ganhos de produtividade, investimento, e expansão de novas atividades “verdes”. O investimento é o grande responsável por este forte ritmo de crescimento, que tende a crescer ainda mais, registrando expansão média de 4,8% ao ano neste período, em média. Parte expressiva deste investimento está voltado à consolidação de uma infraestrutura de energia limpa, de transporte e indústria de baixo carbono. Isso representa um esforço de capitalização significativo, mas factível: implicaria elevar a taxa de investimento do país para patamares entre 20-25% do PIB nas próximas décadas, um importante salto em relação ao nível médio vigente entre 2015 e 2024, em torno de 16%. Ainda com relação aos investimentos, vale destacar dois aspectos fundamentais:

- Embora a maior difusão dos processos de eletrificação também estimule a expansão dos investimentos, as alavancas mais importantes estão atreladas ao crescimento do uso da biomassa e, conseqüentemente, ao desenvolvimento das cadeias produtivas dos biocombustíveis.

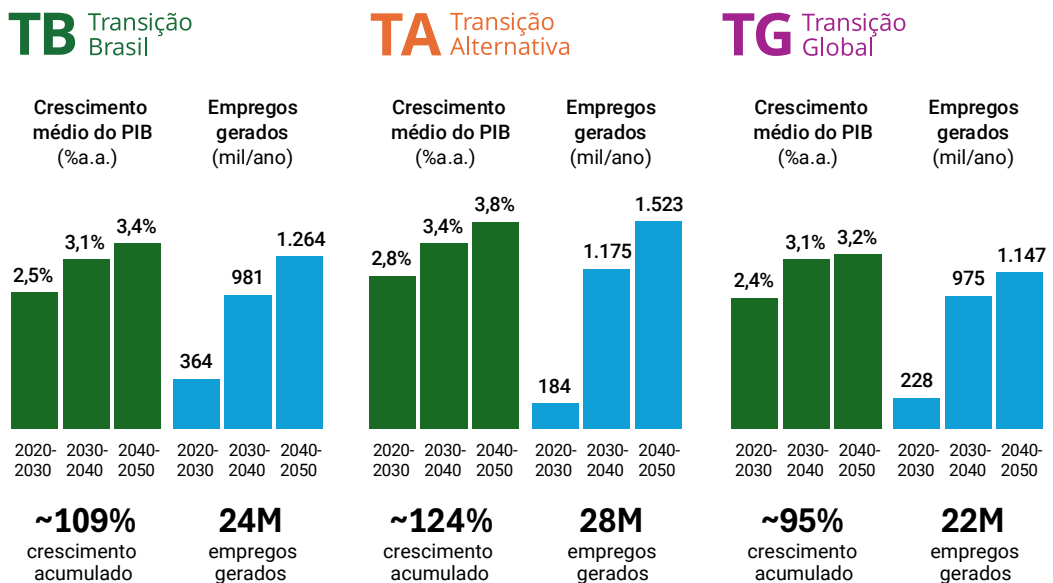
29. Segundo o Sistema de Contas Nacionais (SCN) do IBGE

- Como parte expressiva do investimento está diretamente associada ao desenvolvimento da infraestrutura energética, denota-se uma trajetória expansiva robusta da “construção civil”, a qual aparece como uma das atividades de maior crescimento, com ampla contribuição para a geração de empregos.

No cenário TA, o crescimento econômico médio é ligeiramente maior (3,2% a.a.) quando comparado ao crescimento médio do cenário TB (3% a.a.) – enquanto no cenário TG (2,8% a.a.) o crescimento é menor comparado aos dois cenários. Entretanto, as diferenças acumuladas ao longo de 30 anos são significativas.

O maior crescimento dos investimentos no cenário TA está diretamente associado à premissa de uma política industrial efetiva e exitosa, capaz de promover o desenvolvimento da capacidade produtiva de fornecedores locais em bases competitivas, tanto de setores tradicionais quanto de novos segmentos “verdes”. Neste cenário, o principal destaque é o desenvolvimento do setor de biocombustíveis, que registra crescimento de quase 5% ao ano, sendo também impulsionado pela adoção de políticas públicas de incentivo à substituição dos combustíveis fósseis.

Gráfico 20. Crescimento do PIB e empregos gerados

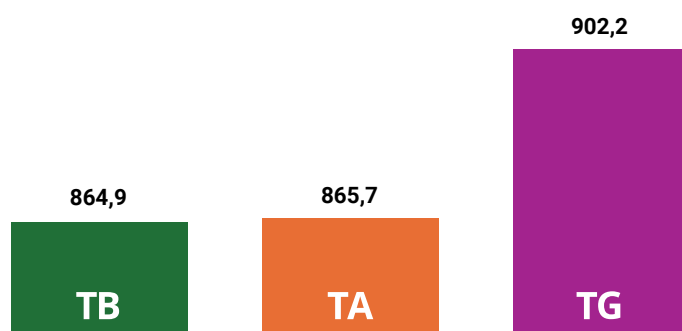


No cenário TG, as grandes mudanças no contexto energético, traduzidas em forte redução na participação das fontes fósseis na oferta primária, embora também representem oportunidades econômicas para o desenvolvimento de novos negócios entre eles a extração de minerais críticos e estratégicos geram custos econômicos adicionais significativos. A transformação necessária para tornar este cenário factível requer que principalmente os segmentos energo-intensivos necessitem desembolsar valores, tanto em termos de OPEX quanto CAPEX, consistentemente superiores aos demais cenários.

Dessa forma, uma das causas principais para o cenário TG registrar um menor crescimento econômico diz respeito aos custos médios mais elevados. Considerando o somatório de OPEX e CAPEX médio dos setores energo-intensivos e do uso do solo, chega-se a custos anuais cerca de 4,3% ao ano maiores (entre 2025 e 2050) quando comparados aos custos incorridos pelos mesmos setores no cenário TB; na comparação com o cenário TA estes mesmos custos médios do TG superam em 4,2% ao ano.

Por fim, convém destacar que embora a modelagem utilizada não tenha abordado cenários alternativos para questões macroeconômicas importantes, tais como a taxa básica de juros e indicadores fiscais, são assumidas as hipóteses de uma política monetária e creditícia adequada (acomodatícia) e indicadores de endividamento público sustentáveis no longo prazo.

Gráfico 21. **OPEX + CAPEX de setores energo-intensivos e uso do solo**
(média anual em US\$ bilhões entre 2025 e 2050, a preços de 2023)



Dados esses custos mais elevados, podemos inferir que o cenário TG é compatível com níveis inflacionários superiores aos demais cenários utilizados neste estudo.

Eficiência Energética

Os expressivos ganhos de produtividade também estão refletidos em uma maior eficiência energética da economia. Em outras palavras, o PIB pode crescer vigorosamente enquanto a demanda energética total aumenta de forma muito mais contida.

Usando como referência o cenário TB, há claro descolamento entre as trajetórias de PIB e de consumo de energia primária: enquanto o PIB avança ~3% a.a., a demanda de energia primária cresce apenas 0,7% a.a. em média entre 2025 e 2050. Na medida em que nos outros dois cenários também há esse descolamento, usaremos os resultados do cenário de referência do estudo (TB) para a discussão a seguir.

Este hiato pronunciado evidencia grandes ganhos de eficiência energética, ou redução da intensidade de energia por unidade de produto. Um dos fatores por trás dessa melhoria é o chamado “efeito composição” do PIB. À medida que a estrutura produtiva se transforma, setores tradicionalmente energo-intensivos passam a ter crescimento menor que a média, ao passo que setores menos dependentes de energia ganham participação.

Conforme mencionado, atividades como metalurgia, mineração, produtos não-metálicos, têxtil, papel e celulose, química, entre outras, apresentam expansão inferior ao PIB. Por outro lado, setores de menor intensidade energética, como bens de capital (máquinas, eletrônicos etc.) e construção civil, exibem desempenho acima da média. Essa mudança estrutural do produto desloca o peso relativo da economia para segmentos que demandam menos energia por unidade de valor gerado, contribuindo significativamente para a queda da intensidade energética agregada.

Para além da composição setorial, observam-se ganhos de eficiência dentro dos setores, especialmente na indústria e nos transportes, que são os maiores demandantes de energia final.

Na indústria, a produção física setorial cresce cerca de 2,8% a.a. (2025-2050), enquanto o consumo de energia primária pelo setor aumenta apenas 1,2% a.a.. Isso implica uma importante redução da energia necessária por unidade produzida, seja via adoção de processos mais eficientes, eletrificação ou reciclagem.

O avanço é ainda mais notável no setor de transportes: apesar do valor agregado do setor de transporte (terrestre, aéreo e aquaviário) crescer ~2,4% a.a., o consumo energético do transporte cai em média -1,1% a.a. ao longo do período.

Este dado indica forte melhoria de eficiência nos transportes, impulsionada pelo avanço na eletrificação da frota, ganhos de logística e mudança modal e redução do uso do transporte rodoviário (menos eficiente que os demais modais). Chama atenção o maior crescimento do transporte aquaviário (2,9% a.a.) um modal mais eficiente que os modais terrestres, em particular do rodoviário, que apresenta um crescimento médio de 2,3% a.a. Este desempenho do transporte aquaviário tem reflexos importantes sobre a perspectiva regional do crescimento (abordada mais à frente), uma vez que parte expressiva das hidrovias estão localizadas na região Norte.

Os usos finais de eletricidade também acompanham essa tendência de eficiência, embora em menor grau. A demanda por energia elétrica cresce cerca de 1,4% a.a., ou seja, duas vezes mais rápido que a energia primária total, mas ainda assim bem abaixo do ritmo de expansão do PIB. Com a maior difusão da eletrificação em processos produtivos e transportes nas fases mais avançadas da transição energética, projeta-se uma aceleração do consumo de eletricidade para ~1,8% a.a. entre 2035-2050. Mesmo nesse horizonte, o consumo elétrico cresce a apenas ~60% do ritmo do PIB, reforçando o ganho contínuo de eficiência. Esse aumento da demanda elétrica futura está associado a um novo ciclo de investimentos em oferta de energia na década de 2040, particularmente na expansão da geração eólica (acompanhando a eletrificação crescente da economia). Em resumo, o cenário delineia uma economia brasileira que cresce e se moderniza consumindo relativamente menos energia, graças à combinação de mudança estrutural setorial, difusão de tecnologias eficientes e eletrificação em larga escala.

Geração de empregos

A criação líquida de empregos é positiva em todos os cenários de transição, mas exige requalificação em alguns setores. Atividades intensivas em mão de obra, como restauração florestal, energias renováveis descentralizadas (instalação de painéis, manutenção de aerogeradores) e transporte público de massa, geram milhões de novos empregos verdes ao longo do período. Por exemplo, só a meta de restaurar 12 milhões de ha florestais pode empregar diretamente entre 1 e 2,5 milhões de pessoas até 2030 – muitas em áreas rurais e no Norte/Centro-Oeste, contribuindo para desenvolvimento local. Da mesma forma, a expansão de renováveis disseminada pelo interior cria empregos na construção e operação das usinas.

Em contrapartida, setores fósseis em declínio (extração de petróleo, carvão mineral, refino tradicional) podem perder empregos; porém, o ritmo é relativamente gradual, dando tempo para políticas de transição justa (recolocação, treinamento, aposentadoria antecipada) mitigarem impactos. Políticas ativas – como programas de capacitação de trabalhadores do petróleo para atuar em eólica offshore ou manutenção industrial de plantas de biocombustíveis – serão fundamentais para garantir que regiões dependentes da renda fóssil (p. ex., Macaé no RJ, polos petroquímicos) encontrem novas vocações econômicas.

Produtividade do trabalho

O forte progresso técnico e o aumento do estoque de capital também se refletem no mercado de trabalho, notadamente em ganhos de produtividade laboral. Enquanto o PIB avança cerca de 3% a.a., a criação de empregos formais cresce apenas ~0,8% a.a. em média (resultados semelhantes em todos os cenários). Logo, a produção aumenta a uma velocidade quase quatro vezes maior que o emprego, implicando uma elevação anual da produtividade do trabalho próxima de 2,2% (medida como a diferença entre crescimento do produto e do emprego) ao longo de 2021-2050.

No cenário de referência, TB, os ganhos expressivos de produtividade do trabalho permitem sustentar alto crescimento econômico com geração relativamente moderada de novas vagas. Contribuem para isso tanto os avanços tecnológicos incorporados (maior automação, digitalização, Indústria 4.0 etc.) quanto fatores demográficos – a população em idade ativa praticamente estagnada (crescimento populacional de apenas ~0,1% a.a.), aliviando pressões por criação de empregos em massa.

Do ponto de vista regional, as cinco macrorregiões do país exibem tendência semelhante em termos de produtividade: o crescimento do emprego fica abaixo de 1% a.a. em todas. As regiões de economia mais dinâmica (como Norte e Centro-Oeste) tendem a apresentar ligeiro acréscimo maior de vagas (~0,9% a.a.), ao passo que nas demais o emprego cresce ~0,8% a.a.. Essas diferenças, porém, são muito pequenas, sugerindo um padrão nacional relativamente homogêneo de baixa elasticidade emprego-produto.

A transição energética de baixo carbono gera ganhos de eficiência generalizados, de modo que o crescimento do PIB supera em muito o do emprego em todo o território – algo compatível com a difusão nacional de novas tecnologias e práticas produtivas.

Quando analisamos a produtividade setorial do trabalho, identificamos em quais

atividades a produção cresce muito mais rápido que as contratações, indicando saltos de eficiência laborativa. De forma geral, os maiores avanços ocorrem na indústria de transformação, especialmente nos setores produtores de bens de capital. Por exemplo, na indústria de “máquinas e equipamentos elétricos e mecânicos” e de “equipamentos de informática, eletrônicos e ópticos”, a diferença entre o crescimento anual do Valor Adicionado e do emprego chega a ~2,4–2,6 pontos percentuais (p.p.), refletindo fortes ganhos de produtividade do trabalho.

Também na indústria automotiva e metalúrgica observa-se produtividade em alta: “fabricação de automóveis e veículos pesados” e “produtos de metal” exibem incrementos de produtividade acima de 2,6 e 2,2 p.p. ao ano, respectivamente, graças a avanços tecnológicos e reorganização produtiva.

Fora da manufatura, merece destaque a agropecuária, cuja produtividade do trabalho cresce de forma acelerada – acima mesmo da média industrial mencionada. Setores agrícolas como lavouras e pecuária combinam crescimento de produção na casa de 3% a.a. com aumento de empregos de apenas ~0,7–0,8% a.a., gerando ganhos de produtividade em torno de +2,3 p.p. ao ano.

Esse desempenho superior da agropecuária está associado à mecanização crescente, agricultura de precisão e melhoria na gestão, fatores que permitem ampliar a oferta sem elevação proporcional do trabalho empregado. No setor de serviços, os ganhos de produtividade são mais modestos em média, dado o caráter intensivo em mão de obra de muitas atividades terciárias.

Ainda assim, há exceções notáveis: por exemplo, serviços como educação privada e serviços pessoais/associativos apresentam diferenciais positivos próximos de +2,5 ao ano, sinalizando oportunidades de eficiência no uso de tecnologia (educação à distância, plataformas digitais) e reorganização administrativa.

Entretanto, a maioria dos serviços cresce de forma mais proporcional em produção e emprego, limitando os saltos de produtividade – na média do setor de serviços, o avanço da produtividade do trabalho fica aquém do observado na indústria.

Tabela 1. Produtividade do trabalho TB

Atividades	Cresc. VA	Cres. Emprego	Diferença
Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	2,9%	0,7%	2,2%
Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	3,0%	0,8%	2,2%
Produção florestal; pesca e aquicultura	2,6%	0,6%	2,0%
Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos	3,0%	0,7%	2,3%
Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	1,7%	0,2%	1,5%
Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração	3,1%	0,7%	2,4%
Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos	3,3%	0,8%	2,5%
Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	3,3%	0,8%	2,4%
Fabricação e refino de açúcar	2,3%	0,4%	1,9%
Outros produtos alimentares	2,9%	0,7%	2,2%
Fabricação de bebidas	2,8%	0,7%	2,2%
Fabricação de produtos do fumo	1,8%	0,3%	1,6%
Fabricação de produtos têxteis	3,2%	0,8%	2,4%
Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	3,2%	0,8%	2,4%
Fabricação de calçados e de artefatos de couro	2,8%	0,6%	2,1%
Fabricação de produtos da madeira	2,6%	0,6%	2,0%
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	2,8%	0,6%	2,1%
Impressão e reprodução de gravações"	1,8%	0,2%	1,6%
Refino de petróleo e coquearias"	1,7%	0,2%	1,5%
Fabricação de biocombustíveis"	2,6%	0,5%	2,0%
Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros"	2,6%	0,6%	2,0%
Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos	2,9%	0,7%	2,3%
Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	3,0%	0,7%	2,3%
Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	2,8%	0,6%	2,1%
Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	3,1%	0,8%	2,4%
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	3,6%	1,0%	2,6%
Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	2,2%	0,4%	1,8%
Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais	2,0%	0,3%	1,6%
Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	2,9%	0,7%	2,2%
Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	3,7%	1,0%	2,6%
Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	3,2%	0,8%	2,4%
Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos	3,5%	0,9%	2,6%
Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças	3,4%	0,9%	2,5%
Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	2,8%	0,6%	2,1%
Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	2,5%	0,6%	1,9%
Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	3,1%	0,8%	2,3%
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	2,5%	0,5%	2,0%
Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	3,1%	0,8%	2,3%
Água, esgoto e gestão de resíduos	2,8%	0,6%	2,1%
Construção	4,9%	1,5%	3,4%
Comércio	3,1%	0,8%	2,3%
Transporte terrestre	2,7%	0,6%	2,1%
Transporte aquaviário	3,4%	0,9%	2,5%
Transporte aéreo	3,3%	0,8%	2,5%
Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	2,7%	0,6%	2,1%
Alojamento	2,6%	0,6%	2,0%
Alimentação	3,1%	0,8%	2,4%
Edição e edição integrada à impressão	3,0%	0,7%	2,3%

Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem	2,4%	0,5%	1,9%
Telecomunicações	2,7%	0,6%	2,1%
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	3,7%	1,0%	2,7%
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	2,7%	0,6%	2,1%
Atividades imobiliárias	2,5%	0,5%	2,0%
Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas	2,5%	0,5%	2,0%
Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P & D	3,5%	0,9%	2,6%
Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	2,8%	0,6%	2,2%
Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual	2,3%	0,4%	1,8%
Outras atividades administrativas e serviços complementares	2,8%	0,7%	2,2%
Atividades de vigilância, segurança e investigação	2,8%	0,6%	2,2%
Administração pública, defesa e seguridade social	3,1%	0,8%	2,3%
Educação pública	3,2%	0,8%	2,4%
Educação privada	3,3%	0,8%	2,5%
Saúde pública	3,2%	0,8%	2,4%
Saúde privada	3,1%	0,8%	2,3%
Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	3,0%	0,7%	2,2%
Organizações associativas e outros serviços pessoais	3,3%	0,9%	2,5%

Balança comercial e competitividade global

Nos cenários desenvolvidos, o setor externo desempenha um papel secundário no crescimento, em contraste com a dinâmica mais exportadora observada historicamente. Conforme destacado, as exportações brasileiras crescem em média apenas ~2% a.a., ritmo bem inferior ao da demanda interna e à tendência passada (1997-2024) de ~5% a.a. Isso significa que a economia projetada é mais voltada ao mercado doméstico, com menor contribuição líquida das vendas externas para a expansão do PIB.

De fato, a participação das exportações no PIB tende a cair levemente – estimativas indicam uma redução de ~4 pontos percentuais até 2050 (por exemplo, de ~19% do PIB em 2021 para cerca de 15% em 2050, em valores constantes). Já as importações acompanham trajetória similar, mantendo a balança comercial relativamente equilibrada ao longo do período (sem déficits ou superávits expressivos).

Esse quadro sugere que a transição energética brasileira ocorre sem apoio significativo da demanda externa, diferentemente de outros ciclos de crescimento brasileiro que foram puxados por exportações (como o boom de commodities dos anos 2000).

O desempenho comedido do comércio exterior está ligado a mudanças na composição das exportações brasileiras frente ao desenvolvimento da economia global de baixo carbono. Setores tradicionalmente fortes na pauta exportadora tendem a perder dinamismo relativo.

Por exemplo, projeta-se declínio nas exportações de petróleo bruto ao longo do período. Mesmo com alguma expansão produtiva interna, a exportação de petróleo e gás natural sofre uma ligeira redução (-0,2% a.a.) no cenário TB, dadas as perspectivas de menor demanda global por combustíveis fósseis e o comprometimento do Brasil em não ampliar significativamente a produção além do necessário para consumo interno. A produção de petróleo e gás passa a se destinar basicamente para o uso interno neste cenário. Se atualmente o peso do petróleo e gás na pauta das exportações é de aproximadamente de 10%, em 2050 esse percentual deve se reduzir para níveis próximos de 5%. Os derivados de petróleo também perdem espaço nas exportações brasileiras, passando de uma participação de 2,4% para 1,8% do total exportado.

Outros produtos primários mantêm crescimento modesto: minério de ferro e metais básicos, por exemplo, devem expandir vendas externas em torno de 2% a.a., ritmo bem menor que no passado recente, refletindo um mercado internacional menos aquecido e pressões por descarbonização nas cadeias industriais.

Produtos agropecuários e alimentos industrializados (principalmente carne) configuram como os principais pilares das exportações, crescendo acima do ritmo de expansão agregada da demanda externa (entre 2,5% e 3% a.a. contra 2% das exportações totais). Isso significa que, a despeito das crescentes restrições sanitárias e ambientais, o Brasil como sendo fundamental para a segurança alimentar global. No entanto, o Brasil perde relevância no tema de segurança energética global, na medida em que deixa de ser um grande exportador de insumos energéticos.

Como já mencionado, as exportações de petróleo e derivados perdem participação na pauta, ao mesmo tempo em que as vendas externas de insumos energéticos de baixo carbono e/ou produtos industriais “verdes” não ganham maior relevância. Os biocombustíveis, por exemplo, mantêm um crescimento apenas em linha com o agregado das exportações, mantendo uma participação tímida na pauta (em torno de 2%). Outros setor energo-intensivos e quem têm alguma importância para o setor exportador, tais como “siderúrgicos”, “químicos” e de “papel e celulose” também não apresentam nenhum grande destaque. Em outras palavras, neste cenário o Brasil não consegue aproveitar seus diferenciais energéticos de baixo carbono para alavancar estes segmentos e ter um maior protagonismo nas cadeias produtivas e no fornecimento global destes produtos.

Em suma, o esperado “novo boom” exportador verde, nos modelos do antigo boom das *commodities* do início dos anos 2000, não ocorre no horizonte dos cenários desenvolvidos.

Contudo, temos alguns poucos destaques na exportação de bens industriais de maior intensidade tecnológica, em particular dos bens de capital. O forte crescimento na produção deste tipo de bens, associado à expansão dos investimentos, estimula também as vendas externas.

Tomando como referência o desempenho do setor industrial de maior intensidade tecnológica no cenário TB, as atividades que ganham relevância, ainda que modesta, na pauta de exportações brasileiras são alguns tipos de bens de capital, tais como as máquinas e equipamentos mecânicos (expansão média de 3,5% a.a.) e os “equipamentos de informática, eletrônicos e ópticos” (crescimento médio de 3,1% a.a.). Outro segmento industrial importante e ganha alguma relevância na pauta exportadora brasileira é o de “automóveis, caminhões e ônibus”, com exportações também crescendo bem acima do comportamento agregado (expansão média de 3,1% a.a.).

A competitividade global da indústria brasileira

A transição impõe desafios importantes à indústria brasileira. A necessidade de cumprir metas de emissões e de incorporar tecnologias limpas pode elevar custos de produção em setores intensivos em carbono, ao menos no curto e médio prazo. Setores como siderurgia, química, cimento e alumínio, por exemplo, enfrentam adaptações onerosas (seja pela troca de insumos, investimento em equipamentos de captura de carbono ou compra de créditos de carbono) que podem reduzir sua competitividade relativa frente a concorrentes de países com metas climáticas menos exigentes.

Sem políticas compensatórias, existe o risco de fuga de indústrias (*carbon leakage*) – deslocamento da produção para regiões onde as restrições climáticas são menores.

Por outro lado, novas vantagens comparativas podem emergir para o Brasil em uma economia mundial descarbonizada. O país, detentor de matriz energética já bastante renovável, pode se posicionar como fornecedor



estratégico de energia limpa e insumos verdes, desde que ultrapasse barreiras internas. Produtos como biocombustíveis avançados, hidrogênio verde, eletricidade renovável e créditos de carbono despontam como potenciais carros-chefe de uma pauta exportadora verde brasileira, podendo inclusive alavancar um processo de neointustrialização da economia brasileira. Com relação aos setores *hard to abate*, em particular aqueles nos quais a descarbonização envolve uma maior eletrificação dos processos industriais, a matriz elétrica mais limpa do país é um diferencial competitivo importante para atração de investimentos de grandes grupos industriais globais associados às cadeias produtivas destes segmentos. Trata-se das oportunidades que o chamado “*powershoring*” pode proporcionar para a economia brasileira. (ANDRADE, 2023)

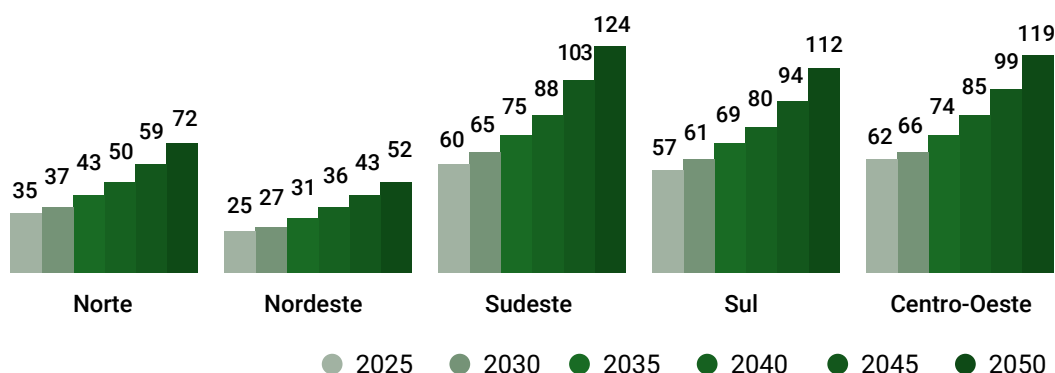
Por consequência, a competitividade global do Brasil no longo prazo dependerá crucialmente de inovar e investir nas cadeias de valor da economia verde, aproveitando suas vantagens (recursos naturais abundantes, matriz elétrica limpa, *know-how* em biocombustíveis) para conquistar mercados em expansão, ao mesmo tempo em que gerencia o declínio inevitável de certas vantagens tradicionais (*commodities* fósseis e intensivas em carbono).

Em síntese, a partir da análise dos impactos macroeconômicos verificamos que a transição energética traz ganhos líquidos positivos no horizonte 2050, com crescimento robusto, em particular de alguns segmentos, e distribuição regional mais equilibrada, mas impõe desafios de curto prazo à competitividade setorial. Embora o cenário base aponte para um desenvolvimento doméstico forte e sustentável, a inserção internacional do Brasil precisará se adaptar: diminuir a dependência de exportações carbono-intensivas e aumentar a oferta de bens e serviços alinhados à economia de baixo carbono, garantindo assim a resiliência da balança comercial e o protagonismo do país na competitividade global da nova energia. ●

Desenvolvimento Regional

A transição energética favorece particularmente algumas regiões brasileiras, dado o perfil dos nossos recursos. Projeções indicam que Norte e Centro-Oeste liderariam o crescimento econômico regional até 2050, com taxas acima da média nacional. Isso porque essas regiões se beneficiam de: (a) Expansão da bioeconomia e reflorestamento (Norte), gerando empregos e investimentos em manejo florestal, créditos de carbono e agricultura sustentável; (b) Investimentos em energias renováveis de grande porte — por exemplo, potencial solar no Centro-Oeste e eólico tanto no Nordeste (já protagonista hoje) quanto também no Norte (energia eólica e solar amazônica, desde que bem planejada, e possivelmente hidrogênio verde associado).

Gráfico 22. Renda *per capita* anual do TB (em mil R\$, a preços de 2021)



O Nordeste continuará sendo um polo renovável (eólica e solar) e de biocombustíveis (cana, biodiesel), mantendo crescimento elevado. Sudeste e Sul também se beneficiam, mas em transição seus setores tradicionais (indústria pesada, refino) precisarão inovar; ainda assim, devem manter crescimento estável com diversificação para indústrias verdes (ex: fabricação de equipamentos de energia, carros elétricos, química verde).

Em suma, do ponto de vista regional, as diferenças em relação ao ritmo de crescimento do PIB entre 2025 e 2050 são apenas marginais, com as regiões Norte e Centro-Oeste crescendo ligeiramente mais (3,2% a.a.), Nordeste e Sul crescendo a

3% a.a. e o Sudeste, a 2,9% a.a.. A despeito de termos uma certa desconcentração inter-regional do crescimento, dado que a região Sudeste, que sozinha concentra cerca de 53% do PIB total do país, apresenta o menor crescimento, as desigualdades ainda são mantidas em níveis elevados. Conforme indicado no gráfico anterior, a renda per capita das regiões do Centro-Sul seguem muito superiores às do Norte e Nordeste. Como indicativo dessa desigualdade, verifica-se que a renda média per capita do Nordeste estimada para 2050, a preços constantes, é ainda inferior às rendas *per capita* médias do Sudeste, Centro-Oeste e Sul de 2025.

Gráfico 23. **Setores-chave de crescimento por região**



Financiamento da transição energética

Um desafio macro é financiar a transição. Porém, há sinais de que direcionar capital para setores verdes pode aumentar a produtividade e modernizar a economia. Instrumentos como taxonomia verde — em linha com a Taxonomia Sustentável Brasileira coordenada pelo Ministério da Fazenda —, títulos sustentáveis (*green bonds*), fundo de transição justa e crédito climático internacional (via carbono) podem canalizar recursos adicionais.

Ao mesmo tempo, ao alinhar-se a uma economia global de baixo carbono, o Brasil protege sua competitividade exportadora – evitando barreiras comerciais de carbono (como taxas sobre aço ou produtos com alta pegada) e aproveitando mercados emergentes (exportar hidrogênio, créditos de carbono, etc.). Em termos das contas externas, a longo prazo a menor dependência de combustíveis fósseis importados pode diminuir a exposição a choques de petróleo e ajudar no equilíbrio da balança comercial através da exportação de insumos energéticos mais limpos, além de bens industrializados com reduzida pegada de carbono.



6

Conclusão

Os cenários do PTE2 fornecem um norte claro: para que o Brasil acelere sua trajetória rumo à neutralidade climática, será essencial articular políticas públicas que criem um ambiente de negócios dinâmico e atrativo a investimentos sustentáveis. O estudo mostra, entretanto, que a viabilidade dessa trajetória está condicionada a incertezas, riscos e custos diversos, afetados por variáveis de natureza política, tecnológica, econômica, geopolítica, social, entre outras. Nesse contexto, a implementação de ações robustas, de baixo arrendimento diante das incertezas, é fundamental.

1. Acelerar investimentos em infraestrutura

Os próximos 5 a 10 anos são críticos para definir o sucesso até 2050. O governo, em parceria com setor privado e bancos de desenvolvimento, deve atrair investimentos em projetos-chave: expansão da transmissão elétrica para integrar novas eólicas e solares em escala; modernização do sistema elétrico para suportar integração de renováveis variáveis; ampliação de ferrovias e hidrovias estratégicas para mudança modal; universalização do saneamento e aproveitamento energético de resíduos; fomento à infraestrutura de recarga de VEs e abastecimento de biocombustíveis. Aprofundar a articulação dos diversos planos setoriais do governo federal em torno do desenvolvimento de uma agenda de infraestrutura para alinhar e priorizar projetos, garantindo coerência com as metas climáticas.

2. Articular a transição energética com a política industrial existente, a fim de potencializar oportunidades regionais e reduzir desigualdades

Para que os benefícios macroeconômicos da transição energética se traduzam em desenvolvimento equilibrado, o Brasil precisa integrar a política industrial existente a uma estratégia territorializada, capaz de aproveitar as vantagens comparativas de cada território e, ao mesmo tempo, enfrentar os desafios da desigualdade persistente na distribuição da renda per capita, ampliando os efeitos da política Nova Indústria Brasil (NIB). No caso do Nordeste, por exemplo, ainda em 2050 a renda média projetada permanece significativamente abaixo das demais regiões do país. Uma política industrial regionalizada e moderna poderia, assim, combinar incentivos específicos para setores estratégicos com investimentos canalizados de forma custo-eficiente em capacitação, inovação tecnológica e infraestrutura para consolidar novas indústrias. Esse arranjo não apenas amplia a competitividade nacional, mas também garante que a transição energética contribua para reduzir os históricos desequilíbrios regionais e sociais do Brasil.

3. Fomentar parcerias e novos modelos de negócios

Para transformar a transição energética em vetor de dinamismo econômico, o Brasil deve avançar na construção de arranjos institucionais que combinem parcerias público-privadas, cooperação bilateral e iniciativas multilaterais. Esses instrumentos podem viabilizar novos modelos de negócios que integrem inovação tecnológica, investimentos produtivos e compartilhamento de ganhos ao longo das cadeias de valor. Além de acelerar a difusão de tecnologias limpas, esse ambiente colaborativo estimula a formação de ecossistemas mais dinâmicos, capazes de impulsionar competitividade, diversificação industrial e geração de empregos qualificados, assegurando que os benefícios da transição sejam distribuídos de forma mais ampla.

4. Aproveitar liderança natural em energias de baixo carbono para influência global

O alto grau da renovabilidade da matriz energética e elétrica brasileira, aliado à expansão de soluções como biocombustíveis e créditos de carbono, fortalece a projeção do Brasil como liderança global em uma economia de baixo carbono. Esse cenário abre espaço para o país ampliar sua influência no cenário internacional – como exemplo, assumindo maior protagonismo na agenda climática da COP30, com a proposição de metas mais ambiciosas e obtendo ganhos comerciais atra-

vés da exportação de energia limpa, tecnologia e expertise. Nesse sentido, recomenda-se que o país fortaleça sua participação em instituições internacionais e fortaleça parcerias Sul-Sul voltadas à produção de hidrogênio verde, com o objetivo de mobilizar recursos e abrir novos mercados. Essas ações tendem a contar com o apoio da sociedade civil, que se engaja mais na transição ao perceber nela a emergência de um projeto nacional competitivo e sustentável.

5. Aprimorar o mercado de carbono brasileiro

Estruturar um mercado de carbono que inclua o setor AFOLU, fortalecendo o SBCE, é essencial para expandir benefícios socioambientais, tais como: a proteção da biodiversidade por meio da conservação da floresta em pé e dos recursos hídricos; e o apoio ao desenvolvimento das comunidades. No entanto, o sistema atual cria brechas, o que compromete a integridade ambiental do mercado e limita sua eficácia na redução real de emissões (CEBDS, 2024). Para tanto, é fundamental a inclusão do setor AFOLU no mercado regulado de carbono, com regras claras e mecanismos robustos de monitoramento, reporte e verificação. Isso contribuirá para a efetiva redução das emissões de GEE, promoverá maior integridade ambiental e garantirá que o mercado opere de forma justa e eficiente. Ao fortalecer o SBCE, também se promove a competitividade da economia brasileira, ao mesmo tempo em que se assegura uma redução custo-efetiva de emissões, em linha com as metas climáticas do país.

6. Implementar um Plano de Transição Justa para setores e regiões vulneráveis

Para evitar a perpetuação das desigualdades sociais, propõe-se a implementação de planos de ação robustos nas regiões mais vulneráveis, com foco na capacitação da força de trabalho, promoção de políticas inclusivas e combate à pobreza energética. Recomenda-se a criação de programas de requalificação profissional para trabalhadores dos setores de petróleo, carvão e indústrias emissoras, com realocação para áreas de energia limpa, a fim de evitar desemprego estrutural. Sugere-se também a criação de um Fundo de Transição, financiado por receitas temporárias de carbono (como leilões de créditos ou taxa de carbono), para apoiar a diversificação econômica de municípios altamente dependentes de petróleo e gás (como Campos e Macaé) e oferecer proteção social temporária. Essas medidas são fundamentais para garantir apoio político e social à transição energética e reduzir resistências.

Da Urgência à Oportunidade

O desafio climático pode ser o motor da prosperidade brasileira, se houver articulação e ambição.

A mensagem central é clara: o desenvolvimento do Brasil só será compatível com a transição energética se houver condições concretas para atrair investimentos e gerar competitividade. Isso exige que o governo promova um ambiente de negócios estável, transparente e atrativo, capaz de dar segurança a investidores e acelerar a inovação. Ao mesmo tempo, é preciso reconhecer a dimensão do desafio: a neutralidade climática em 2050 está longe de garantida.

Se há uma chance real de alcançá-la, ela depende da criação das condições viabilizadoras: coordenação intergovernamental, cooperação entre setor público e privado, engajamento da sociedade civil e visão de longo prazo. Sem essa articulação, o país corre o risco de perder tempo e oportunidades; com ela, poderá transformar a transição energética em vetor de prosperidade, competitividade e liderança global.

7

Metodologia

7.1. Cenários: Estrutura da modelagem integrada



O BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy Systems Model*) constitui-se em um modelo de avaliação integrada para o Brasil, desenvolvido pelo Laboratório Cenergia (COPPE/UFRJ) ao longo das últimas duas décadas. Trata-se de um IAM (*Integrated Assessment Model*) concebido para capturar, de modo abrangente, as inter-relações entre uso da terra, sistemas energéticos e emissão de gases de efeito estufa no contexto brasileiro.

Os modelos de avaliação integrada, ou IAMs, são amplamente reconhecidos em projetos de investigação de alcance global e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) como instrumentos centrais na construção de cenários de transição para economias de baixo carbono. Esses sistemas incorporam variáveis setoriais, fluxos de emissões e os impactos climáticos daí decorrentes, permitindo uma visão sistêmica das transformações necessárias para mitigar o aquecimento planetário.

Ao longo de sua trajetória, o BLUES tem servido de apoio metodológico a múltiplas pesquisas, oferecendo subsídios para a elaboração de narrativas e a comparação de trajetórias alternativas acerca da evolução dos principais setores da economia nacional. Por meio de diferentes hipóteses econômicas, comportamentais e de emissões, o modelo possibilita avaliar de forma comparativa cenários prospectivos que fundamentam decisões de política pública e diretrizes para a descarbonização.

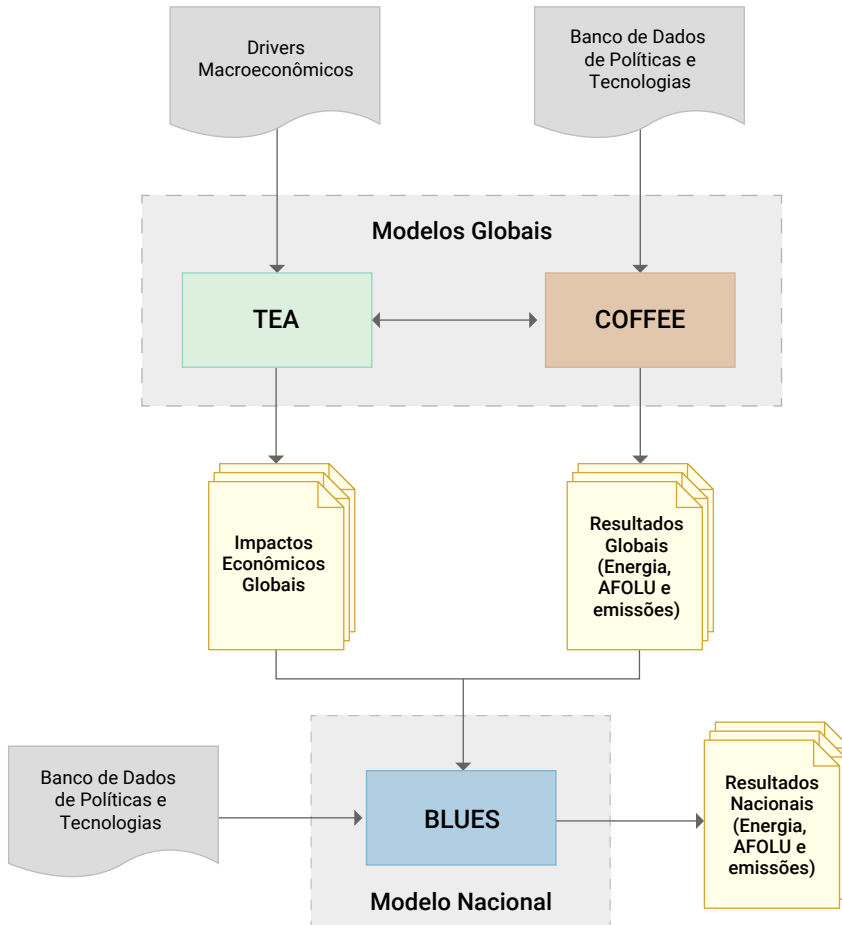
O modelo BLUES pode operar de modo autônomo ou em conjunto com o IAM de abrangência global COFFEE (Computable Framework For Energy and the Environment). Este último figura como uma das quatro plataformas de modelagem global que fundamentaram os cinco cenários ilustrativos de mitigação (IMPs) apresentados no sexto relatório de avaliação do Grupo III do IPCC (WGIII AR6) em 2022.

O COFFEE consiste em um modelo de otimização que detalha minuciosamente as tecnologias dos sistemas energéticos e de uso da terra em uma visão planetária dividida em 18 grandes regiões. Seu propósito é analisar estratégias de mitigação e inovação tecnológica tanto em nível global quanto regional. Adicionalmente, pode ser acoplado ao TEA (Total-Economy Assessment), um modelo de equilíbrio geral computável que simula o comportamento econômico por meio das interações simultâneas entre regiões, setores e agentes. O TEA compartilha a segmentação regional do COFFEE e oferece um nível de detalhamento aprimorado para os setores agropecuário e energético, bem como para as dinâmicas do comércio internacional.

Esse arcabouço de modelagem e suas principais interações está ilustrado na Figura 1. O início do fluxo de informações e dados se dá com a definição dos cenários macroeconômicos e seus principais impulsionadores, como as taxas de crescimento populacional e do Produto Interno Bruto (PIB). A partir desses determinantes macroeconômicos, é iniciado um processo de intercâmbio de informações e interações entre o modelo de equilíbrio econômico geral (TEA) e os modelos tecnológicos globais (COFFEE) e nacionais (BLUES).

Essa interação pode ocorrer de maneira iterativa e contínua, até que se alcance a convergência de parâmetros específicos, ou como um processo único, no qual o modelo de maior abrangência estabelece as condições de contorno, tais como demandas, fluxos de troca e limites de oferta de determinados recursos, para o modelo mais detalhado, porém com menor resolução espacial.

Figura 1. Troca de informações entre modelos de avaliação integrada



Fonte: Elaboração própria

Os modelos TEA e COFFEE produzem os parâmetros centrais que definem tanto a demanda interna como as transações internacionais nos setores de energia e agropecuário para cada um dos cenários de transição rumo a uma economia de baixo carbono. Esses parâmetros alimentam o modelo nacional de energia e uso da terra BLUES, permitindo uma análise detalhada de impactos em setores como o elétrico, na composição da matriz energética e na eletrificação do transporte, no segmento de petróleo e gás, tanto na produção quanto no refino, e na cadeia de biocombustíveis e agropecuária, abrangendo commodities e alimentos.

Devido à estreita interdependência entre essas ferramentas, não é possível desenvolvê-las de forma totalmente independente. A escolha do modelo mais adequado para cada estudo baseia-se em suas características específicas e no tipo de análise desejada, sendo então aplicado isoladamente de acordo com os requisitos definidos para o cenário em questão.

7.2. Cenários: O modelo BLUES



O BLUES foi desenvolvido sobre a plataforma MESSAGE, criada pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) no início da década de 1970 (Schrattenholzer, 1981). Desde 2000, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) tornou-se responsável pela distribuição da ferramenta e implementou uma interface gráfica de usuário mais acessível (IAEA, 2016).

A base matemática do MESSAGE consiste na otimização de uma função objetivo sob um conjunto de restrições que definem a região viável das soluções (IAEA, 2007). O critério de escolha da solução ótima apoia-se no valor dessa função, geralmente orientado para a minimização de custos. Em termos formais, o MESSAGE enquadra-se como um modelo de programação inteira mista, permitindo que certas variáveis assumam valores inteiros, o que o torna adequado para problemas de otimização de sistemas energéticos.

O foco do MESSAGE recai sobre a modelagem de tecnologias capazes de converter uma forma de energia em outra. A cada tecnologia são atribuídos parâmetros técnicos e econômicos específicos. As formas de energia consideram um recurso – seja uma commodity, produto ou forma de energia – em um determinado nível, tal como eletricidade final. Por exemplo, uma usina movida a carvão aparece no modelo como um processo tecnológico que transforma carvão primário em eletricidade secundária. Há ainda tecnologias que simplesmente alteram o nível de energia sem modificar sua forma.

O desenvolvimento do BLUES tirou proveito das potencialidades da plataforma MESSAGE, ao mesmo tempo em que enfrentou suas limitações intrínsecas. Trata-se de um modelo de otimização de custo mínimo orientado ao contexto brasileiro, que utiliza como dados de entrada os custos e as características de desempenho

das diferentes alternativas tecnológicas, tais como eficiências, fatores de capacidade e indicadores ambientais.

Sua lógica consiste em reduzir ao máximo o custo total do sistema, respeitando um conjunto de restrições que traduzem condições reais de operação para todas as variáveis envolvidas.

Para capturar a diversidade territorial e energética do Brasil, o BLUES segmenta o país em seis regiões, sendo uma de âmbito nacional e cinco que espelham a divisão geopolítica. A dinâmica de otimização contempla cenários prospectivos de parâmetros técnicos e econômicos para o período de 2010 a 2050, com saltos quinquenais. Cada anomodelo é decomposto em seis dias-tipo, cada um representando um bimestre, e cada dia em 24 horas, totalizando 144 subperíodos de carga por ano. Em cada um desses intervalos, a geração deve igualar exatamente a demanda. O sistema energético aparece descrito de forma detalhada em suas etapas de transformação, transporte e consumo, apoiado por um portfólio de mais de 1 500 tecnologias customizadas para as seis regiões do modelo.

Convém ressaltar que, por representar simultaneamente múltiplos setores e buscar um resultado de custo mínimo para o conjunto do sistema, o modelo pode não apresentar necessariamente o melhor desempenho em cada segmento específico. O resultado global ótimo decorre, de fato, de soluções que podem ser subótimas em nível setorial, um aspecto cuja compreensão é fundamental para a interpretação adequada dos desdobramentos por área de atividade.

O BLUES inclui, em sua estrutura integrada, o setor energético – contemplando óleo e gás, biocombustíveis e geração elétrica –, os setores de transporte e de edificações, a indústria (dividida em 11 segmentos distintos), o tratamento de resíduos e o complexo agropecuário, que abrange também as mudanças de uso do solo. Em todas essas frentes, o modelo contabiliza emissões de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), bem como poluentes atmosféricos como material particulado fino ($\text{PM}_{2,5}$), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2) (Silva, 2020). Além disso, estão incorporadas ao BLUES diversas medidas de mitigação, tanto para gases de efeito estufa quanto para contaminantes atmosféricos, e o módulo de recursos hídricos habilita a avaliação conjunta da demanda e da oferta de água vinculadas a cada tecnologia e setor analisados. Na sequência, serão detalhadas as principais tecnologias de mitigação adotadas em cada um desses setores.

7.3. Impacto no setor elétrico: O Newave



O trabalho foi executado com base nas premissas e requisitos de planejamento do PDE 2031 e do Caderno de Requisitos do PDE 2032, bem como na documentação oficial de critérios de garantia de suprimento do MME/EPE. As hipóteses sistêmicas (demanda, oferta, transmissão e restrições operativas) foram tomadas a partir desses referenciais, assegurando convergência metodológica com o planejamento oficial brasileiro.

A execução seguiu uma dinâmica iterativa estruturada da seguinte forma:

- Definição da configuração inicial do sistema (mix de oferta e demanda).
- Avaliação dos critérios de suprimento para a primeira configuração, identificando eventuais violações e quantificação da necessidade de reforços em energia e/ou capacidade.
- Sugestão de ajustes da serem modelados no modelo BLUES (*Brazilian Land Use and Energy System*) para re-simulação do caso.
- Avaliação do cenário ajustado e realização de nova verificação dos critérios.
- Repetição do ciclo até que todos os critérios de suprimento fossem atendidos no horizonte de análise.

Esse procedimento foi aplicado, de forma independente, a três cenários (i) Transição Brasil, (ii) Transição Global e (iii) Transição Alternativa conforme a taxonomia de cenários adotada pelo Programa de Transição Energética (PTE).

Cada iteração partiu de um Caso Base PDE 2031³⁰, incluindo: projeções de carga, disponibilidade das fontes (hidro, eólica, solar, gás etc.), limites de intercâmbio e restrições hidráulicas. O Caso Base PDE 2031 foi então ajustado para representar a configuração de Oferta e Demanda definida pelo modelo BLUES.

30. Plano Decenal de Energia disponível na data do estudo.

Premissas

Para o ajuste do caso foram considerados as premissas:

- **Carga:** Foram mantidas as proporções entre submercado, sazonalidades e modulações (patamares) do PDE 2031, sendo que o mercado total foi ajustado para que atingisse o consumo total previsto no cenário para os anos de 2025 em diante.
- **Oferta Hidroelétrica:** As UHEs despachadas centralizadamente foram mantidas, a pouca expansão hidroelétrica prevista foi considerada através do aumento da energia no bloco de PCHs dentro das usinas não simuladas centralizadamente.
- **Oferta Termoelétrica:** A oferta hidroelétrica existente para o caso base foi atualizada considerando a oferta detalhada do PDE 2032. Os montantes totais de capacidade instalada de Gás, Óleo e Carvão foram equiparados aos dados de capacidade definidos no cenário. O mesmo foi feito com a expectativa de crescimento da Resposta da Demanda.
- **Oferta Renovável:** MMD, Biomassa, Eólica e Solar foram consideradas as quantidades de energia definidas no cenário. Os valores para cada submercado foram proporcionais a expansão consideradas no caso base.
- **Sistemas de Armazenamento e Reversíveis:** A oferta de capacidade adicional por meio desses recursos foi emulado através de térmicas com CVU alto, de forma que essas térmicas só fossem acionadas no patamar de ponta (Equivalente a 10 horas por mês, quando acionada). O efeito energético do consumo da bateria durante essas 10 horas mensais foi desconsiderado por ser próximo de zero. O nível do CVU foi ajustado em relação ao CMO do caso, para que fosse maior que o percentil 1% do patamar pesado.
- **O horizonte de simulação** considerado foi de 2025 a 2036.
- **Os dados de interligações:** O intercâmbio entre submercados foi avaliado e dentro das premissas assumidas e cenários definidos não foi necessário a alteração dos limites definidos no caso base.
- **Os dados resultantes**, tanto de oferta e demanda, definidos pelo modelo BLUES são cortes quinquenais, para a consideração anual foi considerado a interpolação linear nos anos intermediários.

Avaliação dos critérios de suprimento

Considerando as premissas e o procedimento de simulação e redefinição da oferta do sistema foi realizado executando os softwares NEWAVE e BALPOT³¹, que possibilitam o cálculo e a avaliação dos critérios, para adequação do suprimento:

- **CVaR 1% da Energia Não Suprida (ENS) \leq 5% da Demanda;**
- **CVaR 10% CMO \leq 800 [R/MWh];**
- **CVaR 5% da Potência Não Suprida (PNS) \leq 5% da Demanda;**
- **LOLP \leq 5%.**

Os critérios de risco considerados abrangem diferentes dimensões da segurança do suprimento. O **CVaR 1% da Energia Não Suprida (ENS) \leq 5% da Demanda** é um critério anual que avalia o risco e a profundidade dos déficits energéticos nos 1% piores cenários de atendimento à demanda. A média do corte de carga nesses cenários não pode ultrapassar 5% da demanda do SIN e de cada subsistema. Esse indicador é fundamental porque, enquanto métricas médias podem ocultar situações extremas, o CVaR revela o tamanho real do déficit quando o sistema falha, capturando eventos de hidrologia crítica e condições adversas de operação que poderiam resultar em longos períodos de racionamento ou estresse energético severo.

O **CVaR 10% do CMO \leq 800 R\$/MWh** é um critério energético-econômico calculado em base mensal. Ele avalia se a média dos 10% piores cenários de custo marginal permanece abaixo de 800 R\$/MWh em todos os subsistemas. Esse critério é relevante porque CMOs persistentemente elevados sinalizam insuficiência estrutural de energia mesmo na ausência de corte de carga, indicando que a matriz não dispõe de recursos energéticos suficientes para enfrentar hidrologias ruins ou baixa geração renovável. Além disso, sua importância está diretamente ligada à modicidade tarifária: CMOs altos se traduzem em aumento de custos setoriais, maior acionamento térmico e volatilidade de preços no mercado.

O **CVaR 5% da Potência Não Suprida (PNS) \leq 5% da Demanda Instantânea** mede o risco e a profundidade dos déficits de potência com base nos 5% piores cenários de atendimento à demanda máxima de potência. A média desses cenários não pode exceder 5% da demanda instantânea do SIN e de cada subsistema. Esse critério foca na severidade das falhas de potência nos momentos de maior exigência do sistema, capturando situações em que há insuficiência de capacidade.

31. NEWAVE. (Versão 28003_L) - Balanço de Potência. (Versão V.0.11.7)

Por fim, o **LOLP \leq 5% (*Loss of Load Probability*)** é um critério anual que estabelece um limite de até 5% para a probabilidade de ocorrência de qualquer déficit por insuficiência de potência no SIN e em cada subsistema. Diferentemente dos critérios baseados em CVaR, que medem a profundidade das falhas, o LOLP mede a frequência com que tais eventos podem ocorrer. Essa distinção é essencial, pois um sistema pode apresentar déficits poucos, porém profundos (indicando CVaR elevado), ou déficits pequenos, porém recorrentes (indicando LOLP elevado). Ambos comprometem a segurança do suprimento, e o LOLP complementa as métricas de severidade ao revelar vulnerabilidades que se manifestam na forma de eventos frequentes, mesmo que de pequena magnitude.

Avaliando os quatro critérios dentro da metodologia sugerida garantiu-se que os cenários desenhados no estudo estão em linha com as práticas de planejamento da expansão.

7.4. Impacto macroeconômico: Matriz insumo produto e modelo de equilíbrio geral



A modelagem econômica foi implementada através da integração do modelo EFES (*Economic Forecasting Equilibrium System*) e TERM, modelos de equilíbrio geral computável baseados em matrizes nacionais e regionais de insumo-produto. A integração desses modelos foi desenvolvida pelo Nereus, ligado à Universidade de São Paulo (USP), e Nemea, ligado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A modelagem tecnológica, por sua vez, é realizada principalmente pelo BLUES (*Brazil Land-Use and Energy System model*), modelo de avaliação integrada para o Brasil desenvolvido pelo laboratório Cenergia (Coppe/UFRJ). Juntos, esses modelos fornecem a contextualização e subsídios para a construção de narrativas e cenários para o Brasil e suas macrorregiões.

O modelo TERM, acoplado ao EFES, realiza a decomposição regional dos resultados dos cenários. A versão do TERM utilizada neste estudo é um modelo de equilíbrio geral computável inter-regional com dinâmica recursiva. Os modelos são do tipo Johansen, em que a estrutura matemática é representada por um conjunto de equações linearizadas e as soluções são obtidas na forma de taxas de crescimen-

to. Nessa tradição de modelagem também estão outros trabalhos para a economia brasileira, como os modelos B-MARIA (HADDAD, 1999), EFES (HADDAD e DOMINGUES, 2001; HADDAD et al, 2011) e IMAGEM (DOMINGUES ET AL, 2009). O TERM herda parte da estrutura teórica do modelo TERM (HORRIDGE ET AL, 2005), com modificações para o caso brasileiro elaboradas pelo Nemea.

O modelo EFES foi utilizado para a elaboração macroeconômicos e setoriais utilizado neste projeto. A base de dados do modelo foi calibrada para o ano de 2015. As simulações partiram do cenário de crescimento do PIB brasileiro elaborada pela Cenergia no seu modelo global para o período 2021-2050, e informações observadas no período 2015-2020. O EFES toma essas taxas de crescimento e adota alguns elementos adicionais de cenário³²:

- Ganhos de produtividade do trabalho obtidos a partir de um modelo de escolaridade e produtividade de trabalhadores, estimado a partir de dados da PNAD. O ganho médio é de 1,6% por quinquênio na produtividade do trabalho em todos os setores;
- Mobilidade social e estrutura de consumo. Cenário de mobilidade social dado por um modelo de microssimulações que permite avaliar como as hipóteses sobre mobilidade social impactam a estrutura do consumo das famílias. Como diferentes classes de renda apresentam diferentes padrões de consumo, os cenários de mobilidade social geram mudanças nas composições dos domicílios ao longo do tempo e, conseqüentemente, alterações no padrão médio de consumo das famílias. Essas alterações são calculadas em termos percentuais, anualizadas e associadas a variáveis de mudanças de preferencias do modelo;
- Mudanças Produtividade Total dos Fatores (PTF) da indústria, setor primário e serviços. Estimam-se as produtividades para os três grandes setores de atividade econômica: primário, secundário e terciário. Estimaram-se níveis e taxas de crescimento da PTF para os referidos setores. As taxas de variação foram compatibilizadas com as taxas nacionais do cenário macroeconômico, de maneira a tornar consistentes todas as estimativas;
- Crescimento populacional de acordo com as projeções do IBGE.

32. Estes elementos estão detalhados nos relatórios do projeto "Opções de Mitigação": <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave>

Assim, no período entre 2021 e 2050 o cenário é orientado por projeções do crescimento do PIB do cenário da Cenergia e os elementos condicionantes acima. Os resultados produzidos pelo modelo são determinados por todos esses elementos de cenário e algumas hipóteses: i) o consumo das famílias segue a renda real de salários; ii) o saldo externo comercial nominal em relação ao PIB é constante; iii) o emprego/salário se ajusta ao longo do tempo a um cenário exógeno de crescimento da oferta de trabalho; iv) o consumo real do governo segue o consumo real das famílias; v) o investimento é endógeno determinado por regras de acumulação em dinâmica recursiva.

Na metodologia utilizada neste estudo, o TERM é alimentado pelo cenário produzido pelo EFES e os condicionantes expostos acima (tanto energéticos como comportamentais). Alimentado por estas informações, o modelo gera um cenário macrorregional consistente com os dados macroeconômicos e demais elementos da simulação.

O TERM é um modelo cuja estrutura central é composta por blocos de equações que determinam relações de oferta e demanda, derivadas de hipóteses de otimização, e condições de equilíbrio de mercado. Além disso, vários agregados nacionais são definidos nesse bloco, como nível de emprego agregado, saldo comercial e índices de preços. A utilização do modelo permite simular cenários e políticas geradoras de impactos sobre preços específicos das regiões, assim como modelar a mobilidade inter-regional de fatores (entre regiões ou setores). Outra característica importante e específica do TERM é a capacidade de lidar com margens de transporte e comercialização diferenciadas regionalmente.

A base de dados do modelo TERM, para 20215, foi construída a partir de diversas informações: matriz de insumo-produto produzidas pelo Nereus, Contas nacionais, Tabelas de Recursos e Usos, POF, RAIS, Comercio Exterior e Contas Regionais. O modelo TERM conta a mesma desagregação setorial do EFES (66 setores/produtos).

Bibliografia

Augustine, C., & Blair, N. (2021). *Storage Futures Study Storage Technology Modeling Input Data Report*. 84. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78694.pdf>

Barcelos, D., Executivo, V.-C., Fagan Costa, C., Linda, V., Mendes, M., Vinícius, D., & Ferreira, H. P. (2022). *O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científicos*. 1–26. <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>

CEBDS. (2024). *Raio-X CEBDS: Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE)*.

CEBRI. (2024). *Alternativas de descarbonização para o setor de transporte marítimo no Brasil: 2024*.

CEBRI, “Neutralidade de carbono até 2050: cenários para uma transição eficiente no Brasil,” 2023.

Climate Policy Initiative; IRENA. (2025). *Global Landscape of Energy Transition Finance*. Disponível em: <https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2025/11/Global-Landscape-of-Energy-Transition-Finance-2025.pdf>

Collins, S. P., Storrow, A., Liu, D., Jenkins, C. A., Miller, K. F., Kampe, C., & Butler, J. (2021). *Ecosystem restoration job creation potential in Brazil*. 167–186.

DOMINGUES, E. P; MAGALHÃES, A. S.; FARIA, W. R. Infraestrutura, crescimento e desigualdade regional: uma projeção dos impactos dos investimentos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) em Minas Gerais. *Pesquisa e Planejamento Econômico* (Rio de Janeiro), v. 39, n.1, p. 121-158, 2009.

EMBRAPA. (2020). *Mitigação das emissões de Gases de Efeitos Estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC : estimativas parciais*.

Empresa de Pesquisa Energética, “Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031,” 2022.

EPE. (2021a). *Cenários Energéticos: Plano Nacional de Energia 2055*. 167–186.

EPE. (2021b). ESTUDOS PARA A EXPANSÃO DA GERAÇÃO: Metodologia de Quantificação dos Requisitos de Lastro de Produção e Capacidade. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, 71. <https://doi.org/10.4000/rccs.833>

- EPE. (2023). *Metodologia de Estimativa de Requisitos de Flexibilidade no SIN*. 1–19.
- EPE. (2025). BEN. *Relatório Síntese 2025*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf
- G20 Brasil. (2024). *Declaração de Líderes do Rio de Janeiro*. 24. <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/g20-rio-de-janeiro-leaders-em-portugues.pdf>
- Garcia, A. R., Filipe, S. B., Fernandes, C., Estevão, C., & Ramos, G. (n.d.). *Powershoring pode transformar a economia brasileira*.
- Ge, M.; Friedrich, J.; Vigna, L. (2024). *Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector*. WRI. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>.
- HADDAD, E. A.. *Regional Inequality and Structural Changes: Lessons from the Brazilian Economy*. 1. ed. Aldershot: Ashgate, 1999. v. 1. 210p .
- HADDAD, E. A.; DOMINGUES, E. P. EFES: Um modelo aplicado de equilíbrio geral para a economia brasileira: projeções setoriais para 1999-2004. *Estudos Econômicos*. São Paulo, v. 31, n.1, p. 89-125, 2001.
- HADDAD, E.A.; DOMINGUES, EP ; PEROBELLI, FS. Emission Reductions: Effects of Taxation on Carbon emissions in the Economy. In: Sergio Margulis; Carolina Dubeux; Jacques Marcovitch. (Org.). *The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities*. 1ed. São Paulo: FEAUSP, 2011, v. 1, p. 67-68.
- HORRIDGE, M; MADDEN, J; WITTEWER, G. The impact of the 2002–2003 drought on Australia, *Journal of Policy Modeling*, vol. 27, no. 3, pp. 285-308, 2005.
- IAEA. (2016). *Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide*.
- IBGE. (2025). SCNT - Sistema de Contas Nacionais Trimestrais. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html>
- ICS. (2025). *Economia Circular como Alavanca para a Descarbonização do Setor Siderúrgico Brasileiro*. <https://climaesociedade.org/publicacao/economia-circular-como-alavanca-para-a-descarbonizacao-do-setor-siderurgico-brasileiro/>
- IEA. (2023). *Global Energy System – Energy Mix: Total energy supply, World, 2023*. Disponível em: <https://www.iea.org/world>
- IEA. (2023). *Greenhouse Gas Emissions from Energy – Data Explorer*. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>

IEA. (2025). *World Energy Outlook 2025*. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1438d3a5-65ca-4a8a-9a41-48b14f2ca7ea/WorldEnergyOutlook2025.pdf>

IMAFLORA. (2016). *Boas Práticas Agropecuárias reduzem as emissões de GEE e aumentam a produção de carne na Amazônia*.

IMAFLORA. (2025). Potencial de Redução de Metano na Política Setorial de Mitigação da Agropecuária: Plano ABC e Plano ABC+.

INESC. (2024). A regulação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) no Brasil.

Instituto E+ Transição Energética. (2025). Powershoring in the Global South : Unlocking Green Industrial Potential General coordination.

IPAM. (2017). Plano Estadual de Agricultura Familiar.

IPAM. (2023). Ação mais efetiva para reduzir o desmatamento é comando e controle.

IPBES. (2019). The Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services: Summary for Policymakers. Disponível em: https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf

IPCC. (2022). Special Report: Global Warming of 1.5°C – Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>

IISD. (2025). COP 30 Outcome: What it means and what's next. Disponível em: <https://www.iisd.org/articles/insight/cop-30-outcome-what-it-means-and-whats-next>

IRENA. (2023). The Changing Role of Hydro Power: Challenges and Opportunities, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

MAPBIOMAS. (2024). Mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil de 1985 a 2023. https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/08/Fact_Colecao-9_21.08-OK.pdf

MAPBIOMAS. (2024b). Panorama do Fogo em Pastagens Plantadas no Brasil.

Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética, “Caderno de Requisitos de Energia e Potência do PDE 2032,” 2022.

Ministério de Minas e Energia, “Critérios de Garantia de Suprimento – Sumário Executivo,” 2019.

Pereira, R. (2009). Setor elétrico brasileiro - uma aventura mercantil.

ROCHEDO, P. "Development of a global integrated energy model to evaluate the Brazilian role in climate change mitigation scenarios", v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2016.

Santos, A., Maia, P., Jacob, R., Wei, H., Callegari, C., Oliveira Fiorini, A. C., Schaeffer, R., & Szklo, A. (2024). Road conditions and driving patterns on fuel usage: Lessons from an emerging economy. *Energy*, 295 (January), 130979. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130979>

SEEG. (2024). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil. <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>.

Schrattenholzer, L. (1981). The Energy Supply Model MESSAGE. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-81-031. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/1542/>

Waskow, D.; Garcia, M.; Srouji, J.; Swaby, G.; Larsen, G.; Cogswell, N.; Alayza, N.; Oliveira, M.; Robinson, M.; Barber, C.; Sandrini, M.; Silverwood-Cope, K. (2025). Beyond the Headlines: COP30's Outcomes and Disappointments. WRI. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/cop30-outcomes-next-steps>

WRI. (2022). O papel da regeneração natural assistida para acelerar a restauração de paisagens e florestas: experiências práticas ao redor do mundo. Nota prática. São Paulo.

WRI. (2025). Climate Watch Historical GHG Emissions. 2025. Washington, DC: World Resources Institute. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>

CEBRI

**Centro Brasileiro de
Relações Internacionais**

Rua Marquês de São Vicente, 389
Gávea - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
22451-044

Tel: +55 (21) 2206-4400

cebri@cebri.org.br

www.cebri.org

Realização

CEBRI

BID

cenergia

COPPE
UFRJ

epe
Empresa de Pesquisa Energética

50 ANOS
fipe

MRTS
CONSULTORIA

Apoio

VEIRANO
ADVOGADOS

Patrocinadores

bp

edp

ENGIE

equinor

ExxonMobil

SIEMENS
energy

VIBRA

BNDES

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO