



PROGRAMA DE
**TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA**

FASE 2

Relatório Executivo

Os resultados da Segunda Fase do Programa de Transição Energética do CEBRI refletem o processo de construção e desenvolvimento de trajetórias e cenários elaborados pelo Cenergia, FIPE e MRTS. Por isso, não expressam necessariamente a visão individual das instituições que participaram do Programa, nem tampouco incorporam outros trabalhos que estão sendo desenvolvidos por essas instituições. As recomendações setoriais devem ser consideradas à luz das medidas de política, trabalhos e análises sobre descarbonização desenvolvidos pelas instituições/entidades setoriais competentes em cada caso. As análises e recomendações de políticas em nível setorial não são exaustivas e estão sujeitas a revisão quanto à validade e à consistência com os marcos regulatórios, técnicos e políticos dos setores envolvidos e com tais marcos no contexto específico do Brasil.

Esta obra está licenciada de acordo com o termo de cooperação técnica previsto para o Programa de Transição Energética II (ATN/OC-21024-BR).

PROGRAMA DE
**TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA**

FASE 2 ➔

Relatório Executivo

Realização



Apoio



Patrocinadores



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, Taís Nogueira Morais, André F. P. Lucena, Alexandre Szkló, 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. Metodologia e premissas utilizadas	9
3. Principais resultados	14
3.1. Matriz Energética	17
3.2. Emissões	18
3.3. Transição energética justa	20
4. Roadmaps Setoriais	21
4.1. AFOLU	22
4.2. Indústria	27
4.3. Setor Energético	32
4.4. Transportes	39
4.5. Cidades	49
5. Impactos Macroeconômicos e Regionais	54
6. Conclusão	61
Bibliografia	65

1

Sobre o PTE

O Programa de Transição Energética (PTE) é uma iniciativa conjunta liderada pelo CEBRI, em parceria com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que tem como propósito de identificar medidas setoriais prioritárias para que o Brasil alcance a neutralidade de carbono até 2050. Para isso são utilizadas modelagens integradas das instituições Cenergia/COPPE/UFRJ, FIPE/USP e MRTS/USP – com amplos processos de diálogo multissetorial.

Na sua Fase 2, o PTE atualiza e aprofunda os cenários normativos de descarbonização elaborados na Fase 1, permitindo compreender o que significa para o Brasil atingir a neutralidade de suas emissões até 2050. Nesse sentido, o PTE busca responder às seguintes perguntas norteadoras:

1. Qual é a trajetória de custo ótimo para o Brasil, considerando que o país cumpra sua NDC¹?
2. O sistema elétrico tem capacidade de absorver a maior e mais acelerada penetração de energia gerada por fontes renováveis?
3. As trajetórias de neutralidade de GEE em 2050 são compatíveis com o crescimento econômico e a geração de empregos?
4. Os planos e políticas públicas nacionais dedicados à transição energética em andamento hoje podem corroborar para a redução das desigualdades socioeconômicas regionais?

1. Uma Contribuição Nacionalmente Determinada, ou NDC (do inglês Nationally Determined Contribution) é o plano de ação climática de cada país para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEEs).

Considerando tais objetivos, destacam-se as seguintes observações:

- i. Os cenários são normativos, ou seja, o modelo tem como tarefa inescapável o atingimento da meta de zero emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) até 2050 ou, como é mais comumente chamado, o estado de Net Zero.
- ii. As trajetórias apresentadas pelo modelo obedecem ao princípio do custo ótimo. Dessa forma, pode-se notar que alguns cenários até se tornam mais intensivos em carbono em alguns períodos. Isso se deve ao fato de que o modelo comprehende que naquele cenário uma fonte fóssil pode ser entendida como mais acessível ou barata ao mesmo tempo em que não compromete o atingimento da meta de Net Zero em 2050.
- iii. O estudo ajuda a entender a magnitude do desafio posto para a concretização da transição energética. Por outro lado, ele não quantifica o custo da inação. Para tal, seria necessária uma outra frente de pesquisa dedicada à análise dos riscos climáticos e seus impactos sobre setores produtivos, além da avaliação detalhada de medidas de adaptação.

Os cenários desta pesquisa oferecem três visões complementares sobre como o Brasil pode alcançar a neutralidade climática em 2050:

O **Cenário Transição Brasil (TB)** representa a trajetória de custo ótimo para o cumprimento integral da NDC brasileira: reduzir cerca de 50% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2030 (em relação a 2005), reduzir entre 59% e 67% das emissões de GEE até 2035 e atingir emissões líquidas zero em 2050, explorando vantagens competitivas nacionais como a abundância de renováveis, a bioenergia e o potencial de reflorestamento.

O **Cenário Transição Alternativa (TA)** mantém as metas de cumprimento integral da NDC, mas introduz condicionantes que conduzem ao exercício de uma transição por caminhos tecnológicos e contexto regulatório diferentes de TB — incluindo precificação de carbono, impactos de mudanças climáticas sobre hidrelétricas e demanda elétrica, e mandatos mais fortes para biocombustíveis e eletrificação.

TG

O **Cenário Transição Global (TG)** adota uma trajetória ainda mais desafiadora para o Brasil: um esforço adicional a TB e TA, ao adotar orçamento de carbono alinhado ao limite de 1,5°C, estabelecido baseado em uma alocação das emissões custo ótima a nível global. Esse cenário demanda cortes de emissões mais profundos e rápidos, incluindo a redução antecipada do uso de petróleo e gás e uma maior expansão de renováveis, nuclear e tecnologias de remoção de carbono.

Com base nesses cenários, em especial no TB, o Programa propõe *roadmaps* para cinco áreas-chave (AFOLU, Energia, Indústria, Cidades e Transporte), incluindo recomendações de políticas públicas e orientações estratégicas ao setor privado, de modo a alinhar a transição energética brasileira com suas metas climáticas, explorar as vantagens competitivas nacionais e preparar o país para assumir protagonismo global em soluções sustentáveis.

2

Metodologia e premissas utilizadas

A metodologia do Programa de Transição Energética combina modelagem técnico-científica avançada com um processo de diálogo estruturado entre instituições e atores sociais.

O **Laboratório Cenergia (COPPE)** é responsável pela atualização e expansão dos cenários energéticos do PTE 1, utilizando o modelo de avaliação integrada de oferta e demanda de energia e uso do solo (Brazilian Land-Use and Energy System – BLUES), além de incorporar premissas climáticas, restrições tecnológicas e políticas setoriais. O BLUES constitui-se em um modelo de avaliação integrada 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, além de operar em conjunto com o modelo COFFEE (Computable Framework For Energy and the Environment) para avaliação similar em nível mundial.

A **Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE/USP)** integra 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 distributivos da transição energética para o Brasil. A FIPE também realiza ajustes iterativos para garantir a consistência entre as projeções energéticas e as restrições econômicas dos cenários.

A **MRTS Consultoria** utiliza os dados fornecidos pela COPPE para testar a viabilidade técnica da expansão elétrica em cada cenário. A segurança do suprimento é avaliada por meio de simulações detalhadas do sistema elétrico – incluindo análises de balanço de potência e indicadores de risco, como LOLP² e CVaR³ –, além da verificação dos critérios de suprimento de capacidade firme. Esse processo permite identificar gargalos, restrições operacionais e requisitos de flexibilidade para atender à demanda projetada.

Essas instituições trabalharam de forma integrada e interativa, ajustando seus modelos e resultados com base nas interações cruzadas. As equipes compartilharam dados e ajustaram premissas em reuniões técnicas conjuntas, assegurando consistência global dos cenários..

Detalhamento dos Cenários

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 emissões líquidas zero de GEE até 2050, em linha com a NDC. Adicionalmente, assume-se o cumprimento das metas de uso da terra associadas à NDC, 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.

2. LOLP (Loss of Load Probability): probabilidade de déficit de suprimento em determinado período.

3. CVaR (Conditional Value at Risk): expectativa de perdas associadas a eventos de déficit além de um nível crítico.

Cenário Transição Alternativa (TA)

No Cenário Transição Alternativa (TA) explora-se uma trajetória distinta para o Brasil atingir a neutralidade de emissões em 2050, introduzindo outras trajetórias tecnológicas, climáticas e de políticas públicas que podem afetar 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; maior participação de armazenamento em baterias, 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 globais (como o COFFEE), 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. Comparativo das premissas utilizadas entre os 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	Emissões líquidas zero 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 IMO⁴	NA	Inclusas	Inclusas
Metas ICAO⁵	NA	Inclusas	Inclusas
Setor 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 ⁶ 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

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

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

6. 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.



3 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 possível a premissa de atingimento das metas de curto prazo – redução de 50% das emissões até 2030 em relação a 2005 – e de atingir emissões líquidas zero 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 atrativos 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 de setores de difícil abatimento.

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 inação 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	Penetração de armazenamento e eletromobilidade conforme PDE ⁷	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 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

7. Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 da EPE



3.1

Matriz Energética

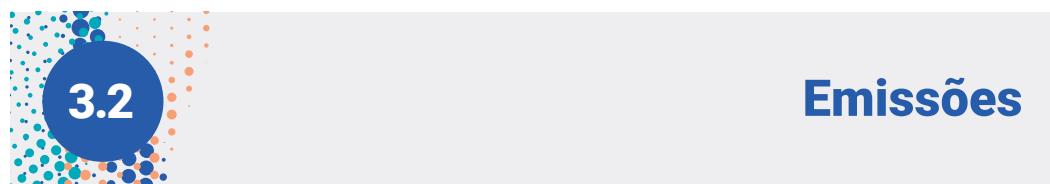
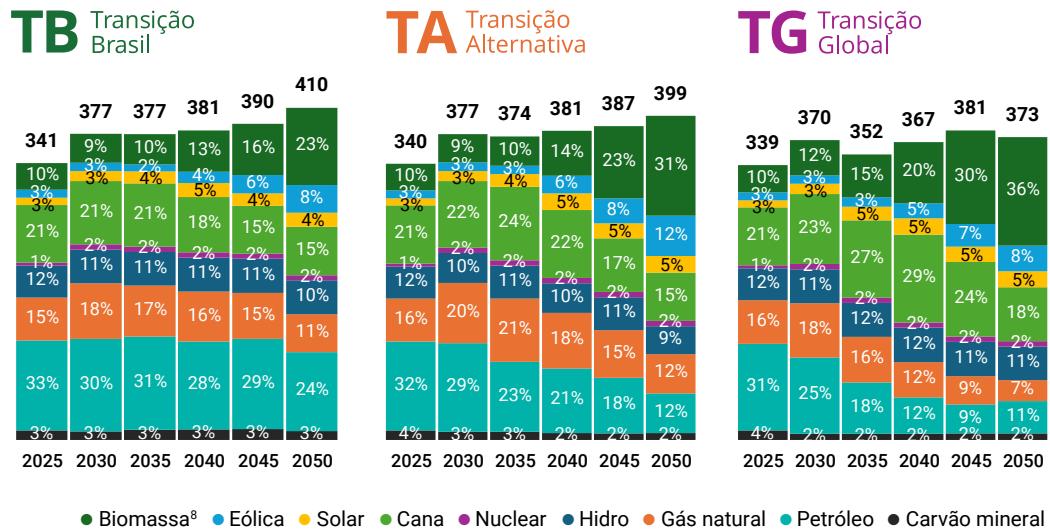
Os cenários do PTE2 confirmam que a matriz energética brasileira pode se tornar ainda mais limpa e diversificada, consolidando a posição do país como líder em fontes renováveis.

No Cenário TB, a participação de fontes renováveis na oferta total de energia primária cresce de cerca de 50% em 2020 para aproximadamente 61% em 2050. A expansão é movida principalmente pela bioenergia e pelas fontes solar e eólica, que juntas suprem 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 cerca de 72% da matriz em 2050, resultado da maior penetração de biocombustíveis e 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.

Gráfico 1. Energia Primária (Mtep)



A trajetória de emissões de GEE mostra que o Brasil pode atingir emissões líquidas zero até 2050 em todos os cenários, embora por caminhos distintos em termos de ritmo e composição setorial.

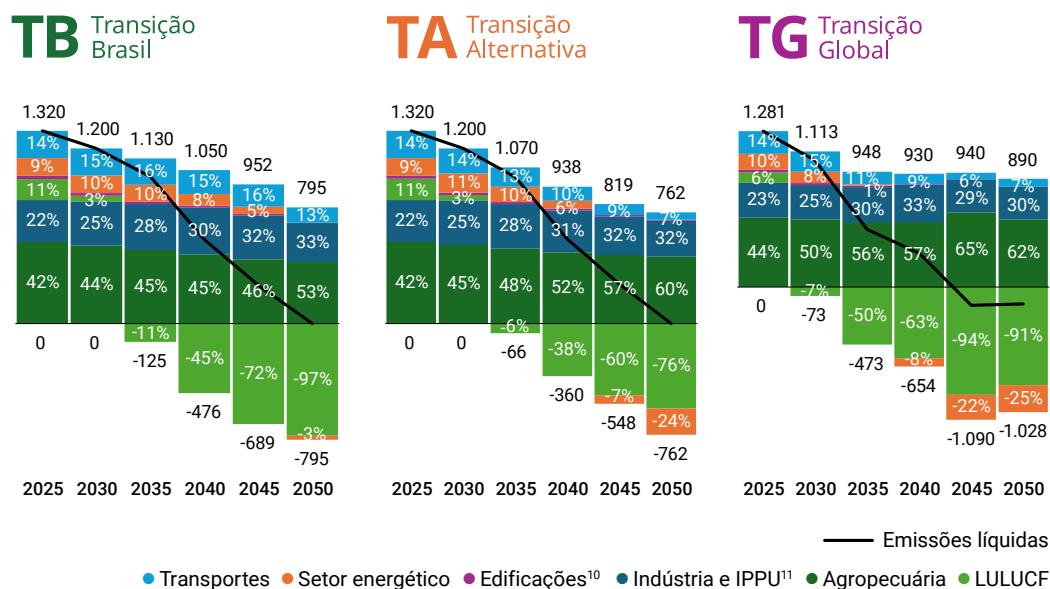
No Cenário TB, as emissões nacionais caem cerca de 50% até 2030 em relação a 2005, em linha com a NDC, e atingem a neutralidade em 2050. O setor de uso da terra (AFOLU) torna-se determinante, com desmatamento ilegal zero a partir de 2030 e reflorestamento de 12 milhões de hectares até 2035, levando o 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).

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

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 rigoroso⁹: apenas 7,24 GtCO₂ entre 2010 e 2050. 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 2. Emissões de GEE (MtCO₂eq)



9. Orçamento mais rigoroso para atender ao orçamento de carbono alinhado ao limite de temperatura de 1,5°C, definido nas premissas do Cenário TG. Para mais detalhes, ver o Quadro 1: Comparativo das premissas utilizadas entre os cenários.

10. 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.

11. 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.



3.3

Transição energética justa

Transição energética justa é um desafio adicional para o país, dado que milhões de pessoas dependem de fontes tradicionais para atender suas necessidades básicas. 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, crescimento econômico sustentável e empregos de qualidade e requalificação da força de trabalho.

A expansão acelerada das energias renováveis e declínio gradual da indústria fóssil no longo prazo afetam de maneira distinta territórios, setores e grupos sociais. 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 cerca 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 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 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 macro e apresenta roadmaps setoriais para cinco áreas estratégicas – AFOLU (agropecuária, florestas e uso do solo), Indústria, Cidades, Transporte e Energia.

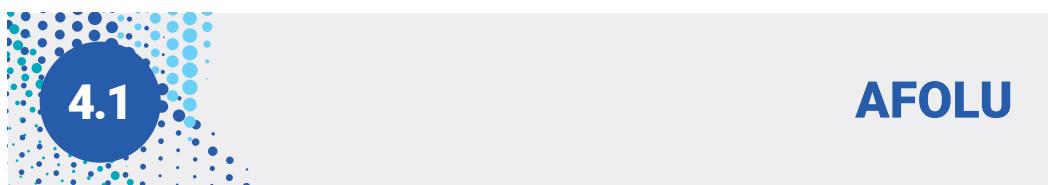
Esses *roadmaps* se baseam nos resultados quantitativos de modelagem para propor ações práticas de transformação, destacando marcos intermediários, tecnologias críticas, políticas públicas necessárias e oportunidades de mercado em cada segmento. Mais do que descrever reduções de emissões, eles sugerem 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 intensa entre instituições parceiras e atores setoriais¹², por meio de reuniões restritas, consultas e debates multisectoriais.

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.



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.

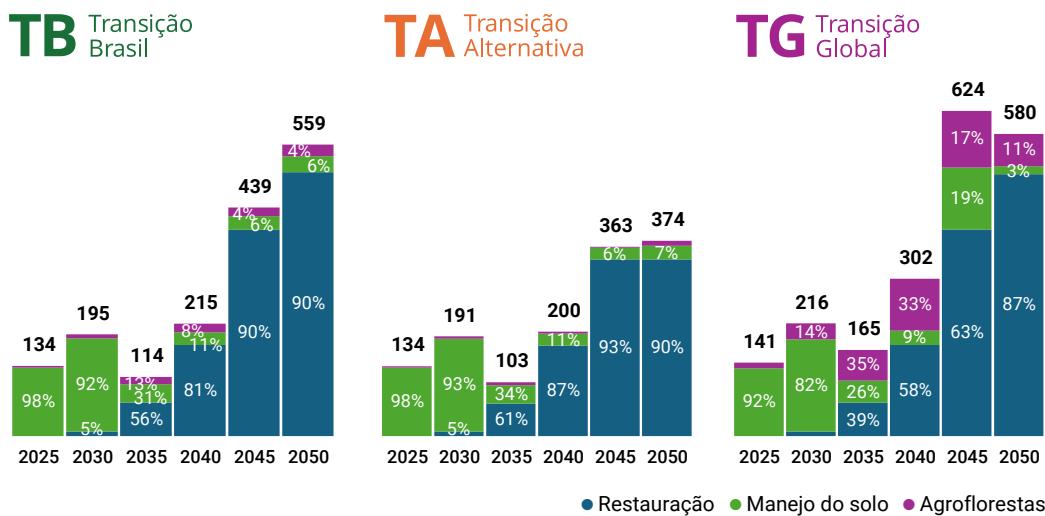
Expansão da biomassa ocorre sem exercer pressão significativa sobre o desmatamento ou o uso da terra. Nesse contexto, a consistência entre restauração florestal

12. 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, Imaflora, 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.

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 3. Remoção de Carbono (MtCO₂)



Curto Prazo (2025-2030):

Eliminação do desmatamento ilegal de vegetação nativa

- Iniciada ampla recuperação de pastagens e adoção de práticas agrícolas sustentáveis;
- Aprimoramento de modelos econômicos para projetos de PSA (Pagamentos por Serviços Ambientais);
- Programas de reflorestamento e restauração ecológica em larga escala começam a ser implementados, visando ~12 milhões de hectares restaurados até 2035;
- Eliminação do uso do fogo no manejo de pastagem para que o setor não seja um fator de indução de desmatamento;

- Remoções significativas de CO₂ já em 2030 (~180 MtCO₂/ano via melhor manejo de solos), reduzindo emissões na agropecuária;
- Renovação da frota agrícola com máquinas mais eficientes - tratores, colheitadeiras, pulverizadores, com eletrificação marginal;
- Incentivo ao aumento de eficiência do uso de pastagens, por meio de pastagem regenerativa e tecnologias que aumentam o número de animais por hectare, como curral e bebedouro.

Médio Prazo (2030-2040):

Avanço da transformação do uso da terra

- Conversão de ~25 Mha em sumidouros de carbono por meio de reflorestamento (~3 Mha) e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) (24 Mha);
- Tecnologias de agricultura de baixo carbono (fixação biológica de nitrogênio, dieta animal para redução de metano, gestão de dejetos) tornam-se mais difundidas, diminuindo as emissões setoriais não-CO₂;
- Implementação de ações de controle de metano como gestão de dejetos (ex: biodigestores), manejo de pastagem e melhorias na alimentação animal;
- Aumento da proteção florestal.

Longo Prazo (2040-2050):

Consolidação do AFOLU como setor sumidouro de carbono líquido

- Florestas plantadas e nativas em crescimento removem quantidades maciças de CO₂ (~500 Mt CO₂/ano);
- Sistemas agroflorestais e ILPF são amplamente adotados, integrando bioinsumos;
- AFOLU viabiliza mais de 83% das remoções de carbono necessárias à neutralidade climática do país, além de gerar cobenefícios em biodiversidade e segurança hídrica e geração de empregos verdes;
- Projetos de reflorestamento, manejo florestal sustentável e recuperação de áreas degradadas fortalecem o PIB regional, principalmente das regiões Norte e Centro Oeste.

Papel dos formuladores de políticas públicas

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

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

2. Incentivo a remoções e agricultura sustentável

- a. Implantar pagamentos por serviços ambientais e créditos de carbono florestais, em conformidade com iniciativas como a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA).
- b. 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.
- c. Desenvolver planos de adequação ambiental de imóveis rurais.
- d. Definir uma taxonomia rural sustentável nacional e normativos para a rastreabilidade sanitária e socioambiental.

3. Políticas habilitadoras e planejamento de longo prazo

- a. 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).
- b. 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

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

Oportunidades para o setor privado

1. Mercado de restauração e créditos de carbono

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

2. Tecnologias de baixo carbono na agropecuária

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

3. Bioeconomia e cadeias de valor sustentáveis

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

4. Engajamento em finanças verdes e seguros

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

4.2

Indústria

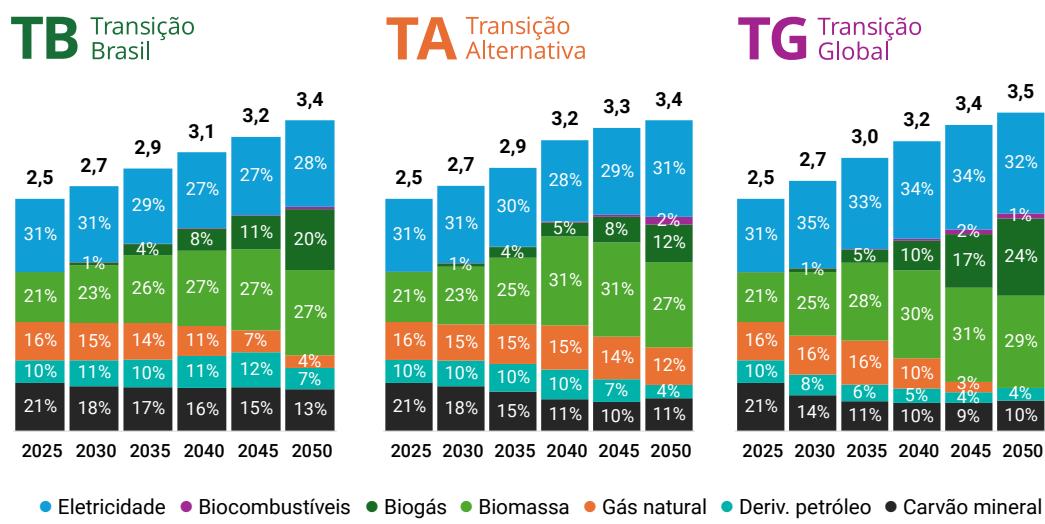
Os resultados do modelo BLUES mostram que a indústria brasileira pode reduzir suas emissões de forma expressiva até 2050, mesmo diante do crescimento da produção.

No Cenário TB, as emissões energéticas do setor, que hoje representam ~87MtCO₂eq, 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 66MtCO₂eq 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 4. Consumo Indústria (EJ)



- Eletricidade
- Biocombustíveis
- Biogás
- Biomassa
- Gás natural
- Deriv. petróleo
- Carvão mineral

Curto Prazo (2025-2030):

Início da modernização industrial com foco em eficiência energética

- Siderurgia: ampliação de rotas de aço verde com uso de carvão vegetal em altos-fornos dedicados;
- Cimento: aumento do coprocessamento de resíduos e biomassa nos fornos (>20% de substituição térmica);
- Química e fertilizantes: uso inicial de matérias-primas verdes;
- Lançamento de iniciativas de desenvolvimento de uma indústria nacional “verde” de bens de capital (aerogeradores, baterias, eletrolisadores, etc);
- Implementação de soluções voltadas para melhorar a eficiência energética das indústrias;
- Desenvolvimento de diversas iniciativas de economia circular, como mineração urbana e a ampliação da cadeia logística para reaproveitamento de resíduos na indústria.

Médio Prazo (2030-2040):

Transformação tecnológica e *fuel switching* acelerados na indústria brasileira

- Siderurgia: aumento do uso de carvão vegetal e biomassa, expandindo a produção de aço de baixa emissão. Início do uso de biometano em substituição ao gás natural fóssil;
- Cimento: ampliação do uso de resíduos e biomassa. Unidades piloto de CCS são instaladas, além do aumento do uso de substitutos de clínquer dado seu potencial para mitigar emissões;
- Química e fertilizantes: maior entrada de matérias-primas verdes e aumento da produção de biomateriais;
- Acoplamento entre as políticas energética e industrial, alinhando o setor elétrico às demandas da indústria e vice-versa, de forma a promover uma dinâmica integrada entre oferta e consumo para fomentar custos competitivos e inovação tecnológica.

Longo Prazo (2040-2050): Avanços finais da transição energética

- Siderurgia: ampliação do uso de biometano em substituição ao gás natural fóssil;
- Cimento: Entrada de CCS para reduzir a intensidade de carbono do cimento;
- Química e fertilizantes: Uso de matérias-primas verdes atinge mais de 50% do consumo energético e aumento da produção de biomateriais;
- Processos industriais optam por eletrificação, biomassa sustentável e/ou CCS;
- Consolidação de um setor de bens de capital “verde” competitivo.

Papel dos formuladores de políticas públicas

1. Regulação de eficiência e financiamento verde

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

2. Fomento à inovação e tecnologias emergentes

- a. Integrar política energética e industrial para fortalecer a competitividade e inovação, facilitando o desenvolvimento de novas cadeias de valor.
- b. Lançar iniciativas público-privadas de P&D direcionadas aos setores *hard-to-abate* (ex: um programa nacional do aço verde).
- c. Desonerar equipamentos e insumos estratégicos à descarbonização (eletroalisadores, bombas de calor industriais, sensores IoT, sistemas de captura de carbono).
- d. Promover uma atuação coordenada entre BNDES, FINEP e MCTI.

3. Mecanismos de mercado e normativos de carbono

- a. Usar a precificação de carbono para induzir a troca de combustíveis e medidas de mitigação.
- b. Introduzir gradualmente parâmetros normativos de carbono (ex: intensidade de CO₂ por tonelada de cimento ou aço).
- c. Utilizar o poder de compra governamental para incentivar a demanda de materiais verdes (ex: obras públicas privilegiando materiais de baixo carbono).

4. Infraestrutura habilitadora

- a. Apoiar a formação e requalificação da mão de obra industrial.
- b. Estimular a criação de clusters industriais, ampliando o acesso a infraestrutura energética e logística compartilhada e polos de CCS com injeção em reservatórios exauridos.
- c. Possibilitar a integração de *hubs* de produção de biometano à rede de gás natural.

Oportunidades para o setor privado

1. Tecnologia industrial limpa

- a. Desenvolvimento de startups (eletrólise mais eficiente, células a combustível industriais e hidrogênio de biomassa/biogás com captura de carbono), além de soluções em CCS (novos solventes, utilidades do CO₂ capturado), e materiais inovadores.
- b. 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

- a. Expansão das cadeias de suprimento de biomassa e resíduos para uso industrial.
- b. Plantio de florestas energéticas, produção de *pellets*.
- c. 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

- a. Aumento na demanda por capital para modificar e construir instalações (fornos elétricos, eletrolisadores, plantas de bioinsumos).
- b. 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.
- c. Regulação do mercado de carbono incentiva demanda (*oftake*) por produtos de baixo carbono.

4. Competitividade e acesso a mercados

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



4.3

Setor Energético

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 hidrelétricas e eólicas¹³.

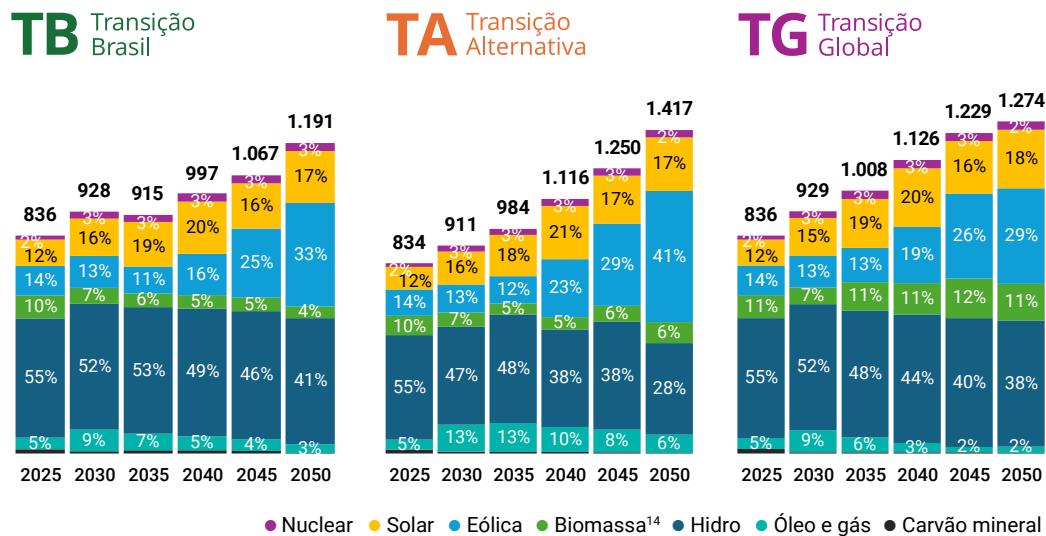
No Cenário TG, a mudança é mais profunda: as renováveis alcançam ~80% da matriz energética em 2050, restando apenas cerca de 20% de fósseis – um virtual abandono do consumo doméstico de petróleo, gás e carvão, com quase toda a expansão de energia suprida por solar, eólica e bioenergia, além de maior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

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.

13. 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 5. Geração Elétrica (TWh)



Curto Prazo (2025-2030):

Ações críticas que viabilizam a trajetória futura da transição energética brasileira, com investimentos maciços em eólica e solar fotovoltaica

Energia Nuclear

- Consolidação de consenso político e social sobre o valor estratégico de se fortalecer o complexo nuclear brasileiro, abrindo espaço para planejamento para novos temas e investimentos;
- Superação do impasse em torno da usina de Angra 3, com conclusão no final dos anos 2030, adicionando 1,4 GW de energia nuclear;
- Aperfeiçoamento do marco legal-regulatório, considerando a participação de novos agentes e investimentos no complexo nuclear brasileiro.

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

Setor Elétrico

- Sinalização de preços adequada de modo a acompanhar a evolução dos requisitos físico operativos do sistema elétrico;
- Diversificação e ampliação da competição na inserção de fontes de potência, flexibilidade e armazenamento, endereçando os desafios atuais para expansão de solar e eólico, incluindo o *curtailment*;
- Planejamento, expansão e novas tecnologias aplicadas às redes elétricas (transmissão e distribuição), contemplando também investimentos em adaptação e resiliência climática e novos vetores de demanda, como *data centers* e *powershoring*;
- Criação de novos parques eólicos no Nordeste e usinas solares distribuídas e centralizadas;
- Adoção de medidas de eficiência energética (técnicas e sistêmicas).

Hidrogênio

- Regulamentação e implementação do marco legal vigente, incluindo o Sistema Brasileiro de Certificação, o Rehidro e o PHBC;
- Continuação de esforços de realização de projetos-piloto e demonstração em aplicações mais promissoras, combinando diversas rotas de produção, combinando diversas rotas de produção, em linha com a estratégia definida no âmbito do Programa nacional do Hidrogênio (PNH2);
- Viabilização dos primeiros projetos em escala industrial no Brasil, combinando o potencial dos mercados domésticos e exportação e superando barreiras de *equity*, financiamento, alocação e gestão de riscos, infraestrutura, etc.

Biocombustíveis e Remoção de Carbono

- Estabelecimento de um ambicioso programa de desenvolvimento de BECCS, com vistas à liderança brasileira no tema;
- Início do co-processamento de óleo vegetal para produção de combustíveis *drop-in* com teor renovável pelas refinarias;
- Investimentos iniciais em projetos de BECCS/CCS, sistemas de monitoramento geológico e em plantas piloto.

Médio Prazo (2030-2040):

Transformação estrutural da matriz energética

- Eólica, solar e bioenergia ganham maior protagonismo na matriz energética;
- Sistemas de armazenamento e resposta da demanda ganham escala para lidar com a variabilidade renovável, bem como flexibilidade operativa;
- Produção de petróleo atinge seu ápice, porém, começa a declinar proporcionalmente nesse período;
- Primeiras plantas comerciais de hidrogênio de baixo carbono conectadas a polos industriais e portos;
- Consumidores de alta intensidade energética atuam como “âncoras” para a expansão da infraestrutura, através de contratos de longo prazo e coinvestimentos que viabilizem a construção de novos ativos de geração e transmissão.

Longo Prazo (2040-2050):

Consolidação de uma matriz alinhada à neutralidade de emissões

- Geração elétrica > 97 % livre de carbono; fósseis residuais concentram-se em usos difíceis de eletrificar (indústria, aviação, navegação) – contribuindo para segurança energética e complementação de potência em períodos de menor disponibilidade dos recursos renováveis;
- BECCS em usinas de etanol/biomassa adiciona remoções negativas, compensando emissões fósseis e não-CO₂ e contribuindo para a neutralidade de emissões economy-wide;
- Solar perde participação relativa, pois os painéis solares instalados na década de 20 chegam ao fim a sua vida útil, e sua substituição se dá de forma mais eficiente por eólica;
- A infraestrutura de redes é modernizada e digitalizada, permitindo alto intercâmbio entre regiões e integração de geração distribuída;
- Consolidação de biorrefinarias, produzindo diesel verde, biobunker, SAF, GLP verde e nafta verde.

Papel dos formuladores de políticas públicas

1. Aperfeiçoamento dos mercados de eletricidade

- a. Introduzir sinais horário-locacionais que valorizem flexibilidade.
- b. Estruturar mecanismos de contratação de serviços (leilões/contratos) que acompanhem as necessidades e dinâmicas físico operativas do sistema elétrico.
- c. Estabelecer contratos que valorem os diferentes atributos das fontes, como a capacidade de suprimento firme e flexibilidade operativa, implementando mecanismos de mercado competitivos.
- d. Avaliar periodicamente os impactos tarifários da geração distribuída e encargos setoriais, garantindo estímulos à transição sem comprometer a modicidade tarifária.
- e. 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

- a. SAF, HVO, biocombustíveis marítimos e biometano, sobretudo para *hard-to-abate*, em linha com o marco legal da Lei Combustível do futuro.
- b. BECCS e outras rotas CCS para captura e remoções de CO₂ no setor energético.
- c. Hidrogênio de baixo carbono e seus derivados.
- d. Sistemas de armazenamento de energia em escala (baterias, reversíveis).

3. Política industrial e inovação em energia

- a. Integrar políticas públicas já existentes de diferentes níveis de governo, coordenando ações e ampliando a efetividade.
- b. Incentivar produção competitiva de aerogeradores, painéis, baterias e eletroliers. (por exemplo, via programas análogos ao Programa Mover / BNDES).
- c. Promover a eficiência energética, otimizando o consumo energético em diferentes setores.
- d. Fomentar P&D compartilhado (hidrogênio, BECCS, CCS) com cláusula de resultado mensurável.

- e. 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

- a. Promover sinalização de preços para reservas operativas e serviços anciliares, integrando tecnologias complementares e com distintas características operativas.
- b. Capturar sinergias industriais com *hubs* de hidrogênio e CCS em zonas portuárias / petrolíferas, com requalificação de trabalhadores.
- c. Adaptar tarifas de energia para populações vulneráveis, com recursos da CDE e Fundo Clima.

Oportunidades para o setor privado

1. Geração renovável e infraestrutura elétrica

- a. Expansão contínua em energia eólica e solar.
- b. Disponibilidade de Power Purchase Agreements (PPA) corporativos de longo prazo com empresas buscando eletricidade 100% limpa.
- c. Investimento em transmissão, soluções de armazenamento (baterias utilitárias, hidroelétricas reversíveis) e serviços anciliares.
- d. 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*.
- e. Crescimento do armazenamento distribuído e gerenciamento de demanda com a volatilidade da geração renovável.

2. Combustíveis de baixo carbono

- a. Alta demanda doméstica e internacional por diesel HVO, SAF e nafta verde.
- b. Geração de créditos de carbono para projetos integrados de BECCS em plantas de etanol, HVO, SAF e outras rotas de biomassa e bioeletricidade.
- c. 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

- a. Direcionamento, pelas petroleiras, da geração de caixa dos fósseis para produção para renováveis ou outros usos, como petroquímica.
- b. Aproveitamento da expertise brasileira em reservatórios para CCS, inclusive para outros setores (indústria, BECCS).
- c. 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

- a. 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.
- b. 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

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.

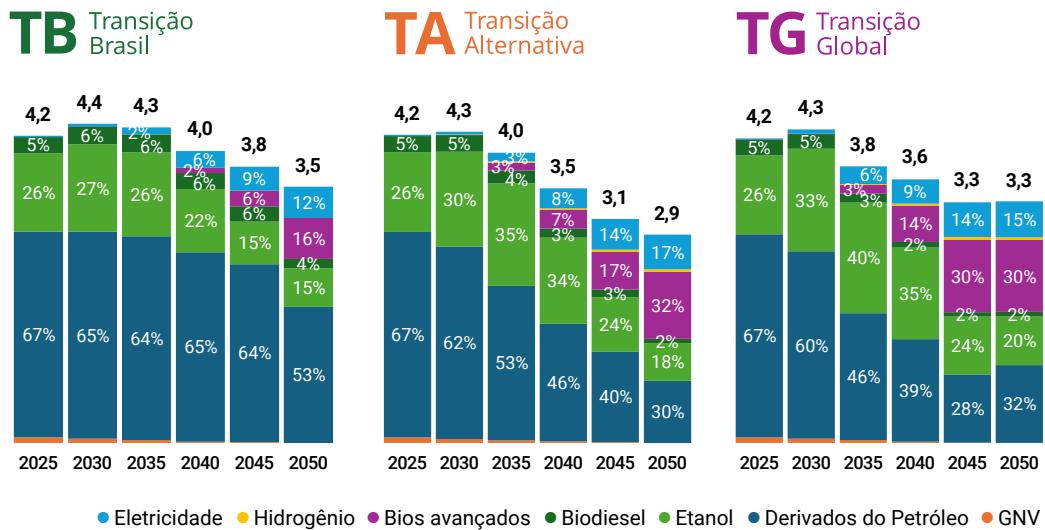
Em todos os cenários do PTE2, há uma tendência de forte queda nas emissões do setor, resultado da combinação entre maior participação de biocombustíveis avançados, eletrificação da frota e mudanças modais em direção a alternativas mais eficientes.

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 veículos e 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.

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.

Gráfico 6. Consumo Transporte (EJ)



4.4.1. Transporte de passageiros

Curto Prazo (2025-2030):

Arrancada da transição

- Queda inicial da participação de combustíveis fósseis, puxada pelo aumento do etanol;
- Forte presença de veículos leves flex entre os modelos com motor a combustão;
- Primeiros passos para a eletrificação: BEVs começam a ganhar espaço em carros e ônibus urbanos, gerando ganhos de eficiência;
- Apoio à implantação de ônibus elétricos nos municípios, por meio de linhas de financiamento como os fundos climáticos (ex.: projetos com BID, Banco Mundial), bem como incentivo no uso de biocombustíveis na frota.

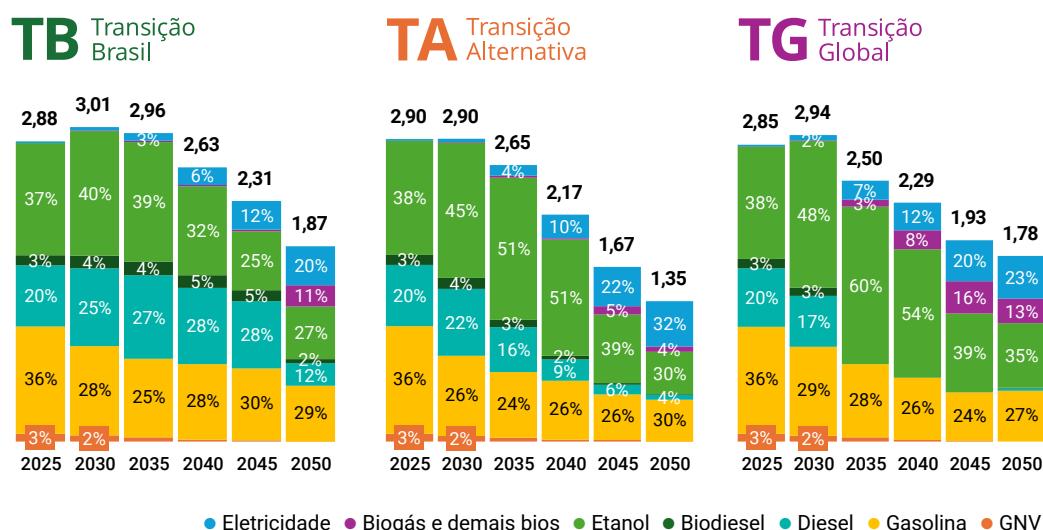
Médio Prazo (2030-2040): Escalonamento da eletrificação

- Eletrificação avança, aumentando a sua contribuição para o serviço de transporte leve;
- Expansão de EV nas novas vendas e ampliação da infraestrutura para maior disponibilidade de carregamento;
- Incentivo ao maior uso de energia renovável para suprir a maior participação de eletricidade no transporte.

Longo Prazo (2040-2050): Consolidação rumo à neutralidade

- Combustíveis fósseis perdem participação de forma significativa na mobilidade de passageiros;
- O mix é dominado por eletricidade, biocombustíveis e combustíveis avançados;
- Eficiência energética da motorização elétrica e uso de renováveis integram a estratégia de mitigação setorial.

Gráfico 7. Consumo Transporte de Passageiros (EJ)



4.4.2. Transporte de cargas

Curto Prazo (2025-2030):

Apesar da difícil eletrificação, ocorrem mudanças iniciais

- Fabricantes lançam caminhões híbridos/elétricos para entregas urbanas e curtas distâncias;
- O teor de biodiesel é mantido em B15, mas passa a permitir *blends* de diesel verde;
- Ganho de eficiência com a melhoria da infraestrutura de transportes (pavimentação, terminais intermodais, etc.).

Médio Prazo (2030-2040):

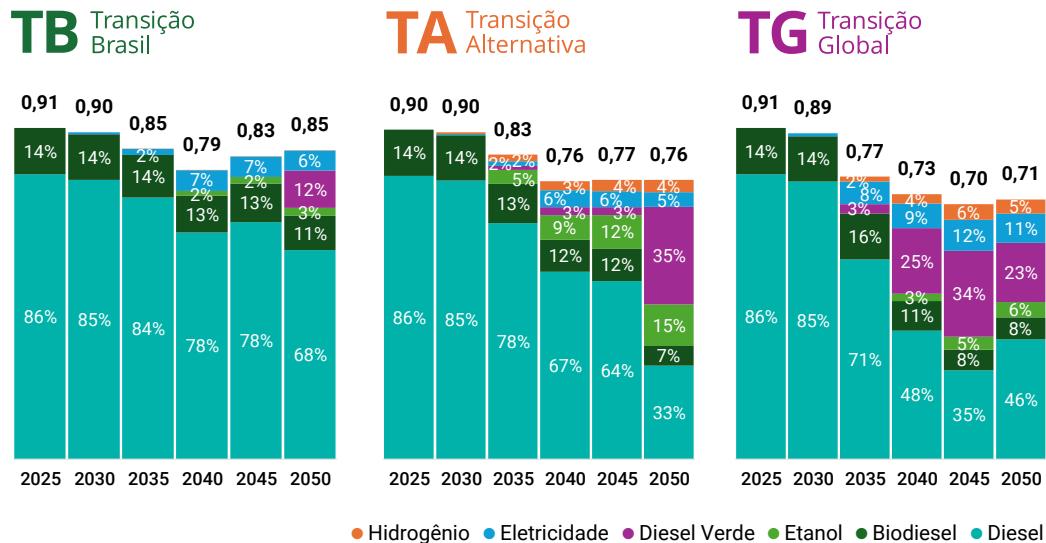
Avanço em múltiplas frentes

- Projetos-piloto de caminhões a célula a combustível de etanol e hidrogênio para rotas mais longas começam a surgir;
- Logística fica mais eficiente: a malha ferroviária amplia participação no serviço de frete;
- Veículos urbanos de carga (VUCs) elétricos se tornam relevantes até 2040;
- Produção de diesel verde começa a ganhar escala.

Longo Prazo (2040-2050):

Difusão comercial de novas tecnologias

- Demanda energética do setor cresce mais rápido que os ganhos de eficiência puxados pelo PIB;
- Ampla penetração de combustíveis alternativos, com biocombustíveis (diesel verde, biodiesel e etanol) atingindo ~26% de teor renovável no final da década;
- Reestruturação da matriz de transportes nacional, promovendo a migração de cargas para modos de alta capacidade e baixa emissão (hidrovias, ferrovias e cabotagem) – adequando a modalidade ao perfil da carga, com foco na eficiência logística.

Gráfico 8. Consumo Transporte de Cargas (EJ)

4.4.3. Transporte Aéreo

Curto Prazo (2025-2030):

SAF incipiente, mas com esforços em P&D

- Realização de voos demonstrativos e comerciais com BioQAV;
- Preparação de regulamentações para atendimento das metas de emissão futuras;
- Marcos regulatórios são estabelecidos (ex: metas como a Lei do “Combustível do Futuro”/ProBioQAV).

Médio Prazo (2030-2040):

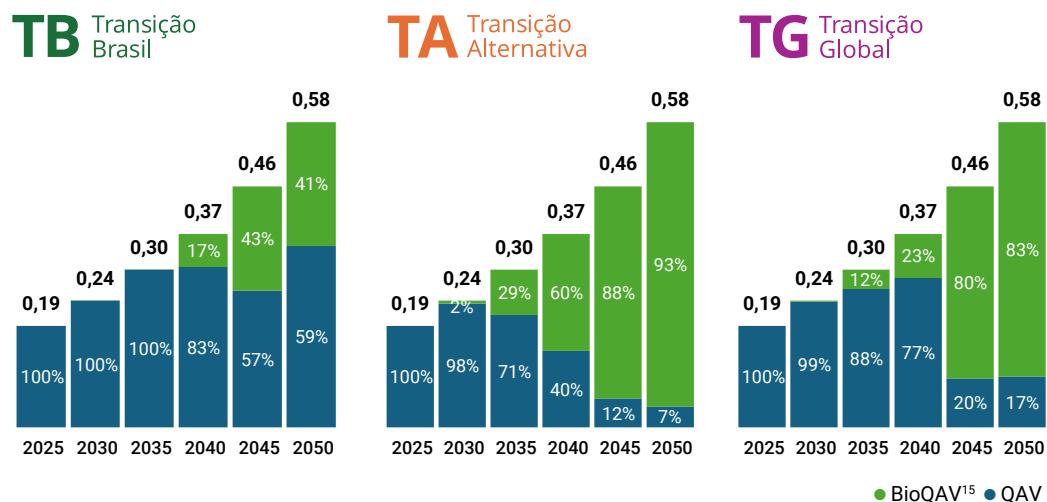
Pavimentação do caminho pós-2040

- Metas de redução de intensidade de carbono na aviação (ProBioQAV) entram em vigor no fim da década, exigindo que o conteúdo de SAF reduza as emissões em 10% a 20% em relação ao QAV convencional.

Longo Prazo (2040-2050): Aceleração da adoção de SAF

- O Brasil se posiciona como hub regional de SAF, atraindo investimentos em infraestrutura;
- Ainda uma prevalência do QAV fóssil com parte das emissões sendo compensadas;
- Aumento da demanda no fim da década esbarra na limitação da capacidade de produção de BioQAV.

Gráfico 9. Consumo Transporte Aéreo (EJ)



15. 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).

4.4.4. Transporte Marítimo

Curto Prazo (2025-2030):

Maior eficiência e uso inicial de biocombustíveis

- Primeiros pilotos de *blends* com bios em cabotagem, ainda sem impacto significativo no consumo agregado;
- Aumento de eficiência em embarcações reduzem o consumo no curto prazo;
- Otimização de rotas, operação e logística portuária por meio de Programas de Descarbonização de Portos.

Médio Prazo (2030-2040):

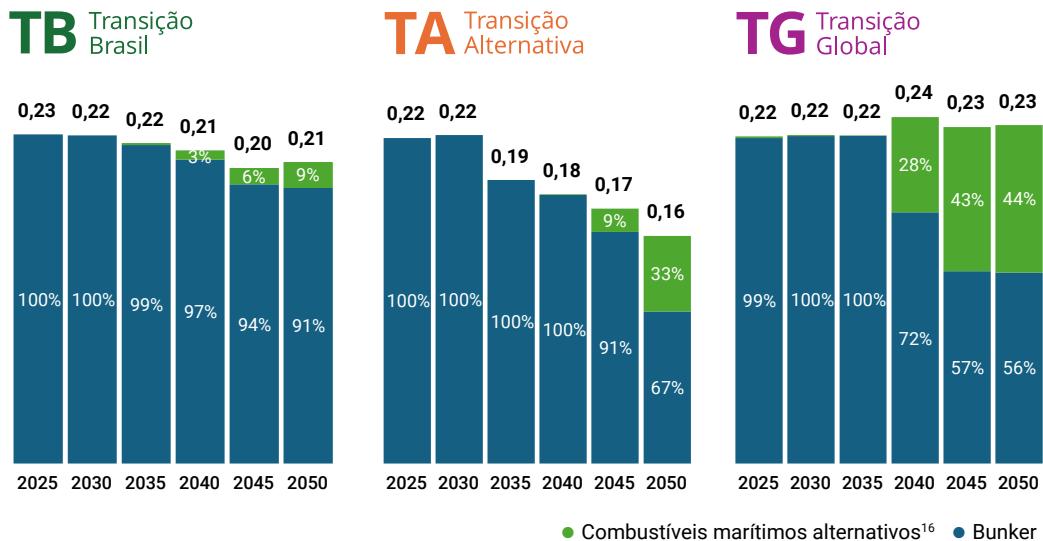
Operação experimental

- Escalonamento gradual de biobunkers avançados nas rotas de cabotagem e nos principais portos;
- Portos estratégicos investem em tanques e logística para abastecimento renovável, integrados a polos de HVO/SAF;
- Primeiros navios demonstradores com motores *dual-fuel* (bunker + metanol verde) entram em rotas de longo curso.

Longo Prazo (2040-2050):

Substituição gradual por biobunker

- O Brasil utiliza e fornece combustíveis marítimos verdes;
- Metanol verde começa a abastecer novos navios de grande porte, mas ainda complementar.

Gráfico 10. Consumo Transporte Marítimo (EJ)

Papel dos formuladores de políticas públicas

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

- Estabelecer metas progressivas de vendas de veículos de baixa e zero emissão – coerentes com o Programa Mover (incentivos industriais e metas de eficiência veicular).

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

- b. 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

- a. 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

- a. Introduzir metas de consumo/CO₂, alinhadas às melhores práticas internacionais.
- b. Retomar programas de inspeção veicular ambiental e segurança.
- c. 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

1. Biocombustíveis e novos combustíveis

- a. Vabilidade da construção e ampliação de plantas de HVO e SAF devido ao aumento da demanda.
- b. 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.
- c. Construção de *hubs* de hidrogênio nos portos ou em corredores logísticos.
- d. 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

- a. 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.
- b. Desenvolvimento de startups de mobilidade elétrica compartilhada e servitização.

3. Infraestrutura e logística verde

- a. Modernização dos terminais de carga intermodais com eletrificação de guindastes, veículos de pátio elétricos.
- b. Concessão de prêmios a contratos de logística limpa por grandes embarcadores buscando reduzir a pegada de carbono das suas cadeias de suprimento.
- c. 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

- a. Expansão de plataformas de roteirização eficiente, otimização de carga (*freight matching*) e gestão de frotas por IA.
- b. 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.
- c. Crescimento de Modelos de Mobility as a Service (MaaS) nas cidades – aplicativos integrando diversos modos e pagamento unificado.

5. Inserção competitiva no mercado internacional

- a. Aproveitamento da participação ativa do Brasil na regulação internacional em órgãos como IMO/ICAO.
- b. Exploração de vantagens competitivas do país (biomassa e eletricidade renovável) para produção de combustíveis sustentáveis na aviação e no transporte marítimo.
- c. 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

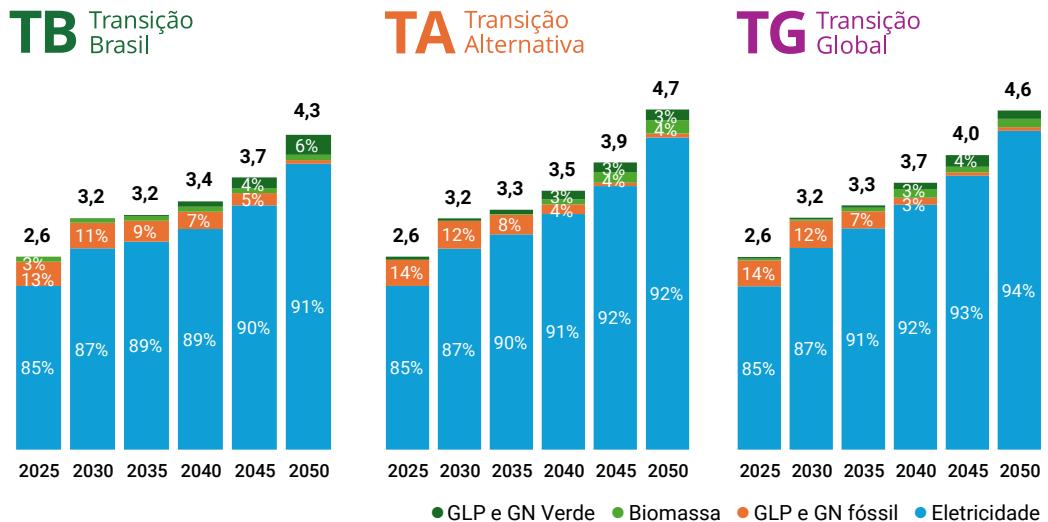
Os cenários indicam que as cidades¹⁷ brasileiras podem reduzir substancialmente suas emissões até 2050 por meio da eletrificação de usos finais e de ganhos de eficiência energética em edificações.

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.

17. Cidades: edificações urbanas (residencial, comercial e público) + serviços urbanos estacionários (iluminação, água/esgoto). Não inclui veículos urbanos – todo combustível queimado em automóveis, ônibus, táxis, etc. está contabilizado no setor Transportes.

Gráfico 11. Consumo Edificações (EJ)**Curto Prazo (2025-2030):**

Fundamentos para eficiência e eletrificação dos usos finais de energia

- Adoção em massa de equipamentos mais eficientes em residências e comércios, como lâmpadas LED e aparelhos de ar-condicionado inverter, incentivada por programas de certificação;
- Início da substituição energética (fogão de indução e aquecedor solar em residências e bomba de calor para aquecimento de água em hotéis e edifícios de alto padrão);
- Expansão exponencial da geração distribuída solar.

Médio Prazo (2030-2040):

Aceleração da transição energética e eficiência

- Incorporação de normas de desempenho energético para edifícios novos e realiza-se um grande esforço de retrofit em edificações existentes, principalmente nos grandes prédios públicos (escolas, hospitais, etc);

- Novos fogões a GLP e caldeiras a gás para aquecimento são praticamente eliminados;
- Expansões significativas de metrô, VLT e BRT, e ocorre eletrificação em massa das frotas de ônibus urbanos, com restrições progressivas ao transporte urbano individual.

Longo Prazo (2040-2050):

Caminho para neutralidade de carbono nos usos urbanos

- A matriz energética urbana é majoritariamente renovável, com eletrificação ampla dos usos estacionários (climatização, cocção, aquecimento de água), embora ainda haja uso pontual de GLP ou gás em algumas localidades;
- Redes inteligentes integram recursos energéticos distribuídos e tornam o consumo urbano mais eficiente e resiliente. A eletricidade renovável cobre mais de 90% de toda a demanda final de energia urbana;
- Bairros sustentáveis com soluções circulares para uma gestão eficiente de energia, água e resíduos.

Papel dos formuladores de políticas públicas

1. Desenvolver políticas de eficiência para edificações

- a. Fortalecer programas de etiquetagem e implementar normas de obrigatórios para novas edificações.
- b. Criar políticas (ISS, IPTU verde) e linhas de financiamento para retrofit em prédios existentes.
- c. Capacitar e certificar mão de obra em construções verdes, garantindo que construtoras e síndicos disponham de conhecimento para adotar as medidas.

2. Promoção de aparelhos eficientes e eletrificação residencial

- a. Estimular a eletrificação de usos térmicos (ex: remover gradualmente subsídios ao GLP e redirecionar para aquisição de fogões elétricos e aquecedores solares).

- b. Integrar políticas sociais: expansão do Minha Casa Minha Vida Verde, incluindo sistemas solares térmicos e projetos de eficiência nas moradias populares.
- c. Garantir a confiabilidade do sistema elétrico frente à nova demanda.

3. Gestão de resíduos e bioenergia urbana

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

4. Cidades inteligentes e infraestrutura urbana

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

Oportunidades para o setor privado

1. Geração distribuída (GD) e armazenamento

- a. Oferta de serviços de aluguel/*leasing* de painéis solares para quem não quer investir antecipadamente.
- b. Desenvolvimento de projetos de *solar community* (geração compartilhada) e rotas inovadoras (telhas solares, fachadas fotovoltaicas).
- c. Oferta de baterias residenciais ou para comércios, agregando valor via *backup* e economia em tarifa associada à GD.

2. Infraestrutura urbana e mobilidade elétrica

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

3. Competitividade e acesso a mercados

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

5

Impactos Macroeconômicos e Regionais

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 desigualdades regionais/sociais ainda devem se manter.

Para transformar a transição energética em efetivo aproveitamento das oportunidades de expansão da atividade econômica, é crucial antecipar tendências – preparando força de trabalho, atrairindo 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.¹⁸), impulsionado por ganhos de produtividade 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:

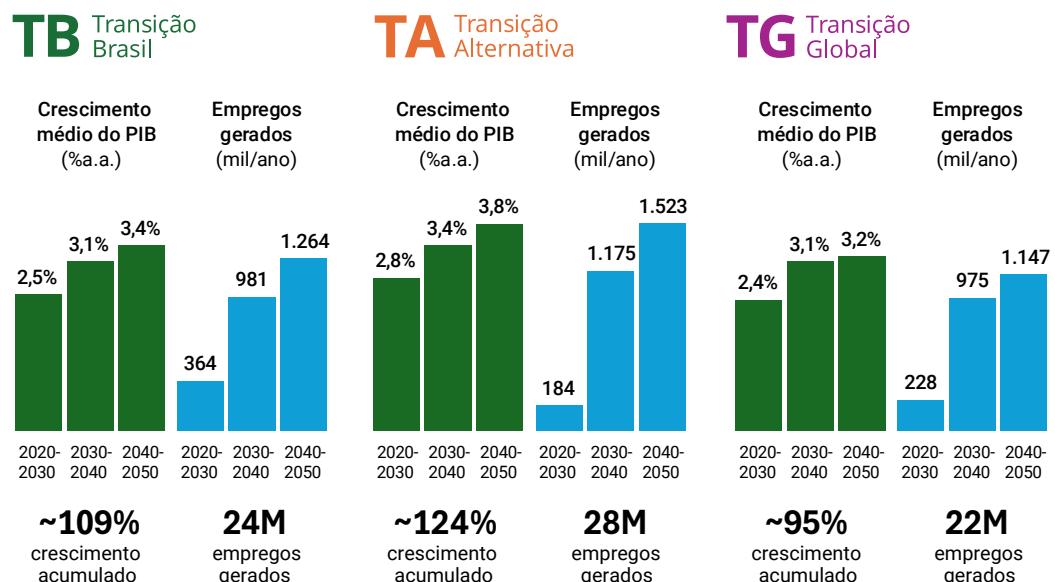
- Embora a maior difusão dos processos de eletrificação também estimule a expansão dos investimentos, as alavancas mais importantes estão atreladas ao crescimento do uso da biomassa e, consequentemente, ao desenvolvimento das cadeias produtivas dos biocombustíveis.
- Como parte expressiva do investimento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

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.

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

Gráfico 12. Crescimento do PIB e empregos gerados

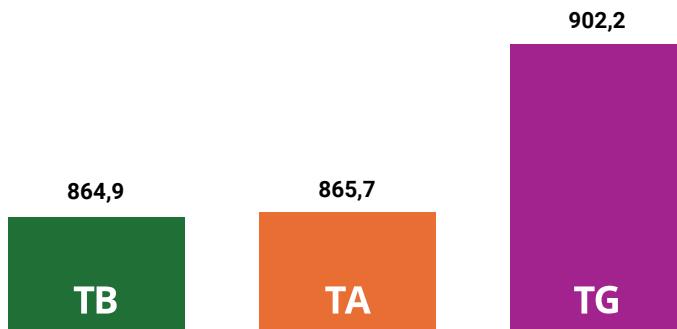


No cenário TG, as grandes mudanças no contexto energético, traduzidas em forte redução na participação das fontes fósseis na oferta primária, embora também representem oportunidades econômicas para o desenvolvimento de novos negócios- entre eles a extração de minerais críticos e estratégicos- geram custos 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 a modelagem utilizada neste estudo não incorporou questões macroeconômicas relevantes, tais como as variáveis de política monetária e creditícia (como a taxa básica de juros), além dos indicadores fiscais e de endividamento público.

Gráfico 13. 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.

Geração de empregos

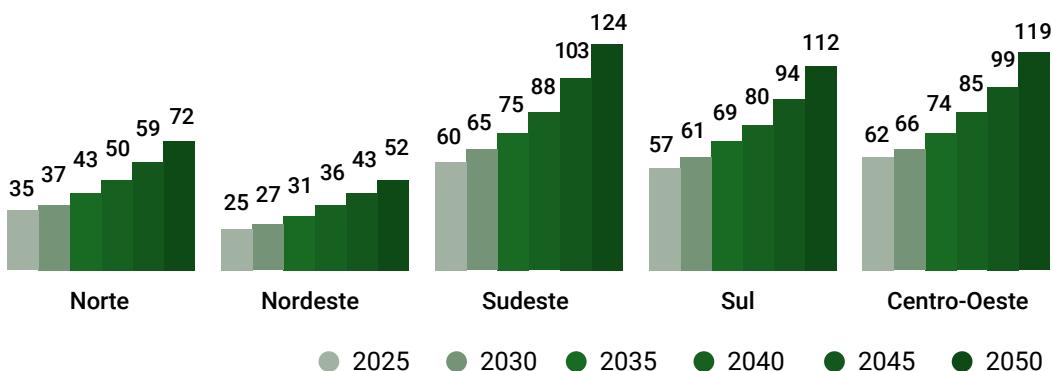
A criação líquida de empregos é positiva em todos os cenários de transição, mas exige requalificação em alguns setores. Atividades intensivas em mão de obra, como restauração florestal, energias renováveis descentralizadas (instalação de painéis, manutenção de aerogeradores) e transporte público de massa, geram milhões de novos empregos verdes ao longo do período. Por exemplo, só a meta de restaurar 12 milhões de ha florestais pode雇用 direta 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, pólos petroquímicos) encontrem novas vocações econômicas.

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 nacional¹⁹. 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 14. **Renda per capita anual (em mil R\$, a preços de 2021)**

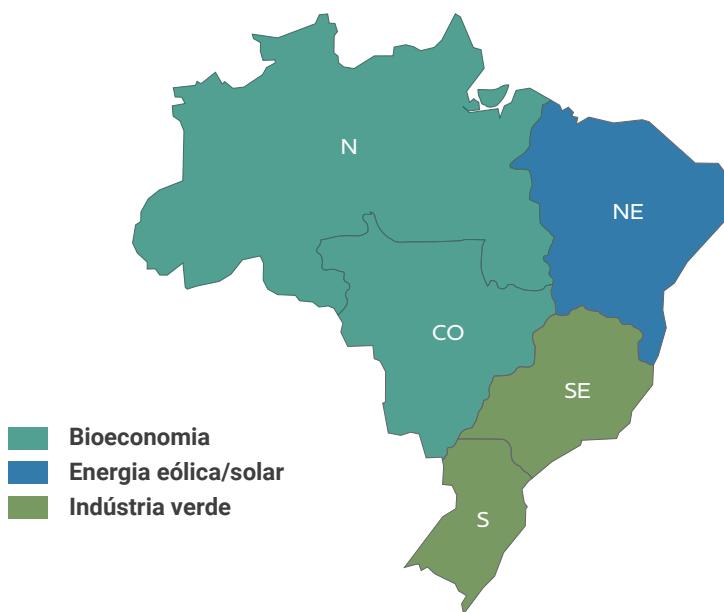


O Nordeste continuará sendo um polo renovável (eólica e solar) e de biocombustíveis (cana, biodiesel), mantendo crescimento elevado. Sudeste e Sul também se beneficiam, mas em transição seus setores tradicionais (indústria pesada, refino) precisarão inovar; ainda assim, devem manter crescimento estável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

19. É importante ressaltar que essa é uma tendência observada nos últimos 20 anos. Embora a transição energética não a modifique, a mudança para uma economia de baixo carbono tende a reforçá-la.

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 15. Setores-chave de crescimento por região



Financiamento e Competitividade

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 arrependimento 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. 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.

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)*.

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.

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

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.

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*.

IBGE. (2025). SCNT - Sistema de Contas Nacionais Trimestrais. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9300-contas-nacionais-trimestrais.html>

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

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*.

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

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>



**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



Empresa de Pesquisa Energética



Apoio



Patrocinadores



Siemens Energy é uma marca licenciada pela Siemens AG.