

PROGRAMA DE
**TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA**

**Neutralidade de carbono
até 2050: Cenários para uma
transição eficiente no Brasil**

Relatório Final da cooperação técnica
ATN/OC-17965-BR

Fevereiro de 2023

FICHA TÉCNICA

Autores

André Bello

Breno Lyro

Gabriel Paiva

Gabriela Gonzalez

Gregório Araújo

Humberto Lima

Luciana Sampaio

Pedro Guimarães

Rafaela Guedes

Thiago Moraes

Yuri Telles

Cenergia: Alexandre Szklo,

Mariana Império, Matheus Poggio,

Roberto Schaeffer

Coordenação editorial

Jorge Camargo

Vice-Presidente do CEBRI

Julia Dias Leite

Diretora-Presidente do CEBRI

Luciana Gama Muniz

Diretora de Projetos do CEBRI

Giovani Machado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais da EPE

Carlos J. Echevarría

Especialista Regional Líder em Energia,
Divisão de Energia do BID

Léa Reichert

Coordenadora de projetos do CEBRI

Design gráfico

Presto Design

Os resultados do Programa de Transição Energética refletem o processo de construção e desenvolvimento de cenários exploratórios e sua quantificação pelo Cenergia. Por isso, não expressam necessariamente a visão individual das instituições que participaram do Programa, nem necessariamente consideram outros trabalhos que estão sendo desenvolvidos por essas instituições.

Naqueles aspectos específicos e recomendações de natureza setorial, devem ser consideradas as 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 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 (ATN/OC-17965-BR).

CEBRI

NÚCLEO ENERGIA

O Núcleo trata do futuro da energia, das tendências energéticas globais e busca soluções para a criação de um ambiente de investimentos competitivo e atrativo para o Brasil.



Jorge Camargo

Vice-Presidente do
Conselho Curador do CEBRI



Rafaela Guedes

Senior Fellow do CEBRI



Gregório Araújo

Pesquisador Sênior

CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS
Rua Marquês de São Vicente, 336 – Gávea
Rio de Janeiro / RJ - CEP: 22451-044
Tel + 55 21 2206-4400 - cebri@cebri.org.br
www.cebri.org



PROGRAMA DE
**TRANSIÇÃO
ENERGÉTICA**

Relatório Final da cooperação técnica
ATN/OC-17965-BR

Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil

Patrocínio:



Apoio:

Siemens Energy é uma marca licenciada pela Siemens AG.

SOBRE O CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS, CEBRI

Independente, apartidário e multidisciplinar, o Centro Brasileiro de Relações Internacionais é pautado pela excelência, ética e transparência na formulação e disseminação de conteúdo de alta qualidade sobre o cenário internacional e o papel do Brasil. Engajando os setores público e privado, a academia e a sociedade civil em um debate plural, o CEBRI influencia a construção da agenda internacional do país e subsidia a formulação de políticas públicas, gerando ações de impacto e visão prospectiva.

Ao longo de vinte e dois anos de história, já realizou mais de 500 eventos, produziu mais de 200 publicações e atua com uma rede internacional de mais de 100 entidades de alto nível em todos os continentes. A instituição se destaca por seu acervo intelectual, pela capacidade de congregiar múltiplas visões de renomados especialistas e pela envergadura de seu Conselho Curador.

Conectado à agenda internacional, o CEBRI identifica e analisa as mais relevantes questões internacionais, promovendo o engajamento entre a produção de conhecimento e a ação política. Atua como a contraparte de instituições estratégicas globais, como o Council on Foreign Relations, nos EUA, a Chatham House, no Reino Unido, além de diversos outros Conselhos de Relações Internacionais no cenário global.

O reconhecimento de sua importância internacional é atestado ainda pela pesquisa *Global Go to Think Tanks*, conduzida pela Universidade da Pensilvânia, segundo a qual é considerado um dos *think tanks* mais relevantes do mundo.



SOBRE O BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO, BID

O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) é uma instituição financeira internacional fundada em 1959 e composta por 48 países membros. Tem como objetivo financiar projetos de desenvolvimento econômico na região da América Latina e Caribe, prestando também assistência técnica a governos e instituições privadas. Suas principais iniciativas se encontram na área de redução da pobreza e da desigualdade, integração regional e comercial, competitividade, produtividade e inovação, e eficiência do gasto público.



SOBRE A EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, cobrindo energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e biocombustíveis. A EPE é uma empresa pública federal, dependente do Orçamento Geral da União.

A EPE foi criada com o objetivo de resgatar a responsabilidade constitucional do Estado nacional em assegurar as bases para o desenvolvimento sustentável da infraestrutura energética do país. A partir de sua criação, a atuação da EPE consolidou-se como parte fundamental de um ciclo de atividades que se inicia com as definições de políticas e diretrizes no âmbito do CNPE – Conselho Nacional de Política Energética e do MME. A partir dessas definições materializam-se os estudos e as pesquisas que irão efetivamente orientar o desenvolvimento do setor energético brasileiro.

Desde sua constituição, a EPE tem participado ativamente das grandes discussões que dizem respeito ao setor energético brasileiro. A Empresa atua no planejamento do setor energético nacional conduzindo os estudos e pesquisas que culminam na construção do conjunto de procedimentos e ações que visam à realização da política necessária ao suprimento de energia. O portfólio de produtos da EPE inclui o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o Plano Nacional de Energia (PNE), o Balanço Energético Nacional (BEN) e o Programa de Expansão da Transmissão (PET).



SOBRE O CENTRO DE ECONOMIA ENERGÉTICA E AMBIENTAL, CENERGIA

O Centro de Economia Energética e Ambiental (Cenergia Lab) foi criado em 2002 como um dos ramos de pesquisa do Programa de Planejamento Energético (PPE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). É um importante *think tank* de planejamento energético para questões latino-americanas e globais, desenvolvendo conhecimento interdisciplinar inovador sobre energia, economia e sustentabilidade ambiental por meio de atividades de pesquisa e ensino, e estudos em colaboração com organizações públicas e privadas e com centros de excelência científica sulamericanos, europeus, norte-americanos e do sudeste asiático.

O CenergiaLab é um centro de excelência internacional no desenvolvimento e aplicação de ferramentas de modelagem de planejamento integrado, apoiando os formuladores de políticas de energia e clima na compreensão das sinergias e dos caminhos da inovação tecnológica para uma transição de baixo carbono no Brasil, na América Latina e no mundo. Vem trabalhando com modelos integrados (IAMs) de otimização energética e ambiental, especialmente com o modelo BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy Systems model*) e modelos satélites de refino de petróleo, de operação do setor elétrico, de otimização espacialmente explícita do aproveitamento da biomassa e de otimização de sistemas termossolares, além dos modelos globais COFFEE (*Computable integrated Framework For Energy and the Environment*) e TEA (*Total-Economy integrated Assessment Model*, um modelo de equilíbrio geral computável). O modelo COFFEE é um dos 4 IAMs globais em que se basearam as trajetórias ilustrativas de mitigação de gases de efeito estufa (*Illustrative Mitigation Pathways*) no último relatório do IPCC (*Sixth Assessment Report – Working Group III*). O Cenergia foi responsável por modelar os cenários de transição energética do Brasil no horizonte de 2050. Para mais informações, ver: <https://www.cenergialab.coppe.ufrj.br>.



ÍNDICE

1. Sumário Executivo	10
2. Introdução	20
3. Cenários de transição energética para o Brasil	22
3.1. Cenário Transição Brasileira (TB)	24
3.2. Cenário Transição Alternativa (TA)	26
3.3. Cenário Transição Global (TG)	28
4. Resultados Gerais	30
4.1. Matriz Energética	30
4.2. Emissões	34
4.3. Agropecuária, Florestas e outros usos do solo	37
4.4. Investimento e Emprego	40
5. Oferta de energia	42
5.1. Geração Elétrica	42
5.2. Petróleo, Gás Natural e derivados	47
5.3. Biocombustíveis Líquidos	54
5.4. Hidrogênio e Biometano	60
6. Demanda	65
6.1. Setor de Transportes	66
6.2. Setor Industrial	72
6.3. Setor de Edificações	75
7. Recomendações para Políticas Públicas	77
Apêndice - Metodologia	79
Incertezas críticas	79
O Ponto de Partida	82
A Conferência das Nações Unidas	83
O Crescimento das Energias Renováveis	84
Premissas Econômicas	85
Modelos de Avaliação Integrada	87
Glossário	100
Referências	102

FIGURAS

Figura 1. Rotas de produção para bioquerosene de aviação ou biojet	56
Figura 2. Processo esquemático de BECCS	58
Figura 3. Principais marcos da Conferência das Nações Unidas	83
Figura 4. Interação entre os modelos de avaliação integrada	88
Figura 5. Representação Esquemática do modelo BLUES	91
Figura 6. Compatibilização das regiões hidrográficas e energéticas no BLUES	92
Figura 7. Produtos agropecuários e energéticos	98
Figura 8. Transições de uso da terra modeladas no BLUES	99

TABELAS

Tabela 1. Principais características dos cenários	23
Tabela 2. Variação dos Fatores de Capacidade	27
Tabela 3. Investimentos Anualizado (2020-2050)	41
Tabela 4. Postos de Trabalho (média anual em milhões)	41
Tabela 5. Aumento da capacidade de transmissão de energia elétrica no Brasil	46
Tabela 6. Uso do Biogás para fins energéticos em 2020	63
Tabela 7. Produção de Biometano por Cenário	64
Tabela 8. Premissas Econômicas e Demográficas	87
Tabela 9. Parâmetros Econômicos das Tecnologias de Geração Elétrica	93
Tabela 10. Parâmetros Econômicos das Tecnologias de Biocombustíveis	95
Tabela 11. Parâmetros Econômicos para carros	95
Tabela 12. Parâmetros Econômicos para motos	96
Tabela 13. Parâmetros Econômicos para ônibus	96
Tabela 14. Parâmetros Econômicos veículos comerciais leves (carga)	96
Tabela 15. Parâmetros Econômicos para caminhões semileves	96
Tabela 16. Parâmetros Econômicos para caminhões leves	97
Tabela 17. Parâmetros Econômicos para caminhões médios	97
Tabela 18. Parâmetros Econômicos para caminhões semipesados	97
Tabela 19. Parâmetros Econômicos para caminhões pesados	97

GRÁFICOS

Gráfico 1. Variação da oferta primária de energia no Brasil (2020-2050)	31	Gráfico 29. Participação dos combustíveis no transporte de passageiros (Gpkm)	69
Gráfico 2. Uso de energia primária por fonte no Brasil	31	Gráfico 30. Participação dos combustíveis no transporte de carga (Gtkm)	70
Gráfico 3. Participação das fontes renováveis no Brasil, em 2050	32	Gráfico 31. Participação das tecnologias nas vendas de caminhões leves	71
Gráfico 4. Variação acumulada da energia primária (2050-2020)	33	Gráfico 32. Participação das tecnologias nas vendas de caminhões pesados	71
Gráfico 5. Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), 2020-2050	35	Gráfico 33. Suprimento do modal aquaviário	72
Gráfico 6. Emissões de CO ₂ , 2020-2050	35	Gráfico 34. Emissões de GEE por segmento do setor industrial (2020)	73
Gráfico 7. Desmatamento ilegal (mil he/ano)	36	Gráfico 35. Uso final de energia por segmento do setor industrial (2020)	73
Gráfico 8. Mudança de uso do solo em 2050 relativo a 2020	40	Gráfico 36. Uso final de energia no segmento siderúrgico	74
Gráfico 9. Capacidade Instalada por fonte no Sistema Interligado Nacional - SIN (dez/20)	43	Gráfico 37. Uso final de energia no segmento de cimento	74
Gráfico 10. Variação da capacidade de geração elétrica no Brasil por fonte e cenário (GW)	45	Gráfico 38. Evolução do uso final de energia do setor de edificações (PJ)	76
Gráfico 11. Geração de eletricidade por fonte e cenário (TWh/ano)	45	Gráfico 39. Capacidade elétrica Brasileira (GW)	84
Gráfico 12. Capacidade de geração elétrica por fonte e cenário (em GW)	46	Gráfico 40. Redução do custo de energia renovável	85
Gráfico 13. Reservas provadas mundiais	48	Gráfico 41. PIB global entre 2020 e 2100 a partir do cenário SSP2	86
Gráfico 14. Produção nacional de petróleo	48	Gráfico 42. PIB brasileiro entre 2020 e 2050 a partir do cenário SSP2 (em US\$ bilhões a preços de 2010)	86
Gráfico 15. Produção de petróleo por empresa	49		
Gráfico 16. Intensidade de carbono do petróleo no mundo (KgCO ₂ por barril)	50		
Gráfico 17. Consumo Brasileiro de Petróleo	51		
Gráfico 18. Uso Brasileiro de Energia Primária	51		
Gráfico 19. Produção, Exportação e Importação de Petróleo no Brasil	52		
Gráfico 20. Produção e Importação de Gás Natural	53		
Gráfico 21. Fator de utilização do parque de refino	54		
Gráfico 22. Produção de Biocombustíveis no Brasil (EJ)	57		
Gráfico 23. Produção de hidrogênio (em Mt)	61		
Gráfico 24. Formas produção direta de hidrogênio (em Mt)	61		
Gráfico 25. Usos diretos do hidrogênio (em Mt)	62		
Gráfico 26. Potencial de biogás por dia (em m ³)	63		
Gráfico 27. Uso final de energia por setor (2020)	66		
Gráfico 28. Matriz energética do setor de transportes (EJ)	68		

Sumário Executivo

NEUTRALIDADE DE CARBONO 2050: CENÁRIOS PARA UMA TRANSIÇÃO EFICIENTE

O Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética (PTE) foi estabelecido com o objetivo de identificar trajetórias de neutralidade de carbono para o Brasil buscando entender quais trajetórias possibilitariam um uso mais eficiente dos recursos e, assim, contribuir, de forma independente e aberta, com a formulação de políticas públicas para a matriz energética brasileira de 2050. Particularmente, ao estruturar diálogos e participação de diferentes stakeholders, o Programa visou desde o início contribuir para a formação de consensos mediante o detalhamento da análise de incertezas críticas, explorando cenários e sensibilidades, de forma a construir uma visão original de trajetórias a partir das particularidades brasileiras.

Avaliar possíveis trajetórias de descarbonização e suas estratégias associadas é desafiador por causa da complexidade em torno do curso da própria mudança climática, da evolução de trajetórias socioeconômicas, assim como do contexto sociocultural e institucional em longos horizontes de tempo. Além disso, em longos horizontes temporais, as estimativas são altamente dependentes das premissas sobre como evoluem as políticas públicas, os consensos sociais, como se comportam as empresas e consumidores, e como se desenvolvem e difundem novas tecnologias.

Dessa forma, a análise de cenários é útil para estruturar o exercício analítico, fornecendo uma narrativa plausível para ancorar dados e hipóteses do arcabouço de modelagem e, assim, ajudar a identificar possíveis opções consistentes de estratégias institucionais e tecnológicas de evolução do sistema energético, do setor de transformação industrial e do setor de uso da terra (florestas e agropecuária).

Assim, os cenários de descarbonização são usados para explorar diferentes opções de mitigação de emissões para alcançar um determinado resultado climático, que se relaciona a metas de limite de aumento da temperatura. Foram elaborados três cenários distintos que convergem para a emissões líquidas nulas de gases de efeito estufa (GEE) no país no horizonte de 2050, intitulados: (i) Transição Brasileira (TB); (ii) Transição Alternativa (TA) e (iii) Transição Global (TG).

Cenário Transição Brasileira (TB): moldado com base nos compromissos assumidos pelo país em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), buscando indicar a trajetória ótima custo-eficiente (com base nos recursos, conhecimento e as expectativas de custos futuro) para Brasil alcançando a neutralidade líquida em carbono em 2050. Neste cenário, o Brasil alcança a neutralidade independente das ambições e compromissos dos demais países. O país volta a figurar entre as economias com grandes e interessantes oportunidades para alocação de capital.

Cenário Transição Alternativa (TA): busca-se testar uma trajetória tecnológica alternativa para o alcance da neutralidade no Brasil em 2050, considerando os impactos da própria mudança climática no setor energético e, principalmente, as incertezas do processo de difusão tecnológica. Trata-se de uma variação do cenário Transição Brasileira, no qual se impõe maiores restrições, de forma a limitar ou induzir a escolha de rotas tecnológicas pelas quais o processo de transição tomará forma.

Cenário de Transição Global (TG): busca destacar a contribuição do Brasil em um mundo que pretende limitar o aumento médio da temperatura superficial global em até 1,5°C em 2100, referente aos níveis pré-industriais. Dentro de um orçamento global de carbono de 400 GtCO₂, com base no mínimo custo global, o Brasil dispõe de orçamento de carbono de 13,2 GtCO₂ para realizar a descarbonização.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CENÁRIOS

	TRANSIÇÃO BRASIL	TRANSIÇÃO ALTERNATIVA	TRANSIÇÃO GLOBAL
Ambiente internacional	Cooperação limitada ("blocos regionais")		Cooperação global ("Vila global")
Contexto nacional	Processo de transição definido a partir do contexto brasileiro		Processo de transição inserido em um contexto mundial
Abordagem	Mínimo custo para NetZero GEE	Mínimo custo, com restrições de CCS e disponibilidade hídrica e premissa de produção de hidrogênio e nuclear	Mínimo custo para um ótimo global 1,5°
Cadeias globais de produção	Orientação mais regional da produção		Nacionalização de segmentos estratégicos
Orçamento de Carbono (2010-2050)	24,3 GtCO ₂	24,9 GtCO ₂	15,3 GtCO ₂
Neutralidade de emissões no Brasil	CO ₂ em 2040 GEE em 2050	CO ₂ em 2040 GEE em 2050	CO ₂ em 2035 GEE em ~2050

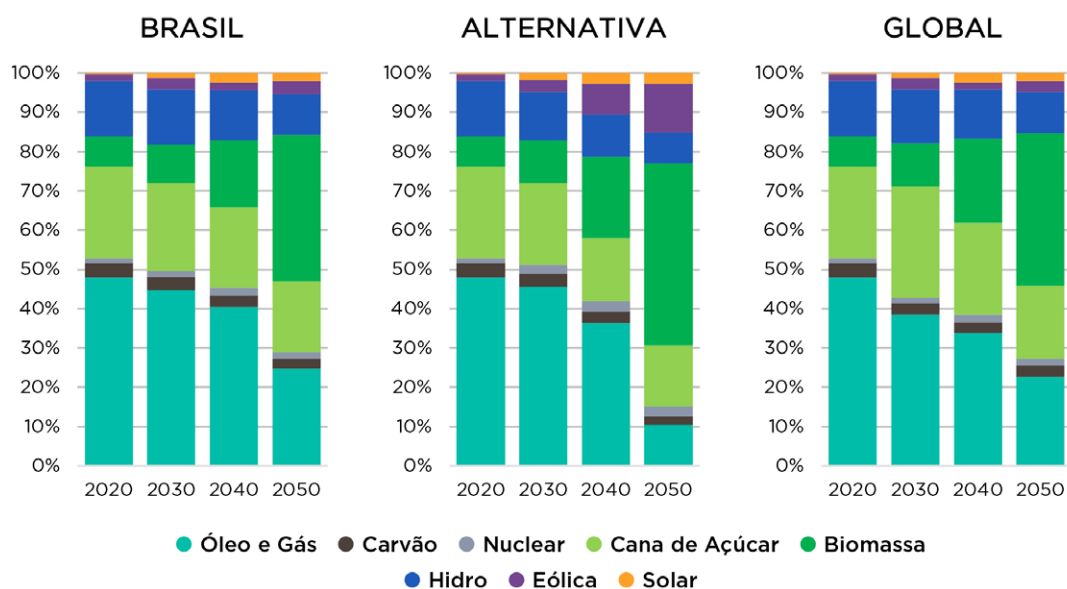
Matriz Energética

O Brasil é um país que está avançado em sua transição energética. Com uma matriz energética com aproximadamente metade da sua energia primária oriunda de fontes renováveis (49% em 2020), se caracteriza como uma das matrizes mais convergentes com uma economia de baixo carbono, com uma renovabilidade três vezes acima da média mundial (14% em 2019). Não obstante, as trajetórias de descarbonização para os próximos 30 anos apresentadas nos cenários mostram dinâmicas para a matriz energética distintas das observadas dos últimos 30 anos, desdobrando-se na necessidade de novas políticas públicas, instrumentos e vetores energéticos a fim de alcançar a ambição climática de neutralidade em carbono.

Nos cenários de neutralidade de carbono deste estudo, a demanda de energia primária se eleva acima de 400 milhões de teps até 2050, um crescimento anual médio de 1,5%, taxa que corresponde a pouco mais da metade do verificado nos últimos trinta anos. O crescimento econômico e populacional são vetores importantes para a elevação da demanda por serviços energéticos, enquanto os ganhos de eficiência atuam como instrumentos de abatimento.

Os três cenários estudados apresentam perfis distintos de matriz energética primária, tanto no total ofertado quanto na composição das fontes energéticas. Em todos os cenários observa-se a queda substancial da utilização de combustíveis fósseis em 2050, que recua para participações entre 13%-27% da matriz energética. Em contrapartida, as fontes renováveis superam os 70% em todos os cenários de neutralidade climática. Essa mudança é liderada pelo crescimento da biomassa, fonte que mais amplia participação na matriz energética brasileira, seguida por eólica e solar.

USO DE ENERGIA PRIMÁRIA POR FONTE NO BRASIL



A biomassa tem um papel de destaque na descarbonização do setor de transportes, sobretudo na substituição de diesel e QAV, mas também, nos cenários TG e TB, como um instrumento de alcance de emissões negativas, por meio do uso relevante de BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*). Já as energias eólica e solar continuam sua marcha de crescimento na matriz, liderando a expansão do setor elétrico com expressivas novas capacidades de geração instaladas.

Emissões

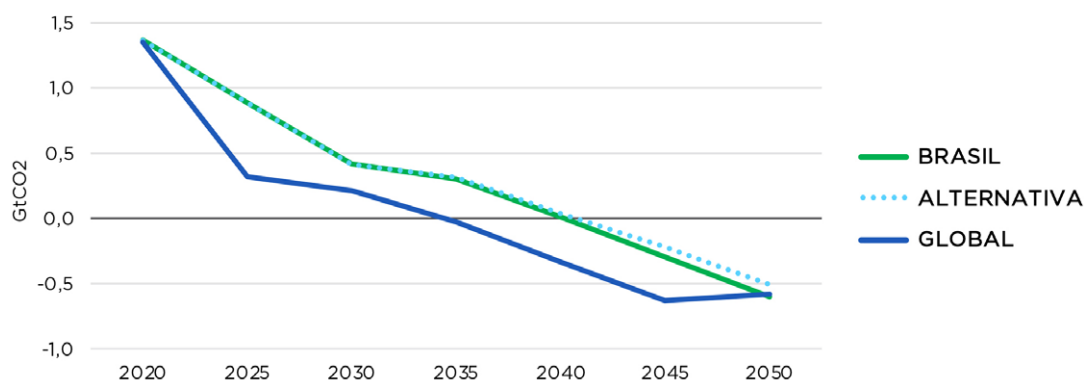
Em 2020, o Brasil emitiu 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq), figurando entre os principais emissores globais anuais. Contudo, em termos per capita, o Brasil é considerado um país de baixa intensidade de emissões com cada brasileiro emitindo, em média, 1,9 tCO₂eq. Isso representa cerca de 1/7 das emissões de um norte-americano e 1/3 de um cidadão europeu ou de um chinês.

A particularidade do Brasil é que a geração de GEE do país não está fortemente relacionada à geração de energia, mas sim às mudanças no uso da terra (desmatamento) e agropecuária, que, juntas, representam 73% das emissões totais no país. Enquanto no mundo, o setor energético é responsável por 76% das emissões de GEE, no Brasil a matriz energética corresponde a 18% das emissões brutas de GEE do país em 2021 (SEEG, 2022).

Os três cenários de descarbonização incorporam as mudanças estruturais para os setores de oferta e demanda de energia necessárias para alcançar a neutralidade climática no Brasil na década de 2050. Para os cenários TB e TA seriam evitadas aproximadamente 30 bilhões tCO₂eq no horizonte e seriam alcançadas emissões líquidas zero em 2050. Para o cenário TG, o esforço de mitigação de emissões é ainda maior, alcançando cerca de 40 bilhões tCO₂eq evitadas no período.

Para que a neutralidade em GEE seja alcançada no horizonte de 2050 é necessário haver emissões negativas de CO₂ em torno de 2035-2040, ou seja, uma década antes do momento de alcance da neutralidade climática no país. Nos três cenários de descarbonização (TB, TA e TG), as emissões de CO₂ são negativas em torno de 500 milhões de toneladas, dimensionando o tamanho do desafio.

EMISSIONES DE CO₂, 2020-2050



Outra conclusão relevante, face à necessidade de haver emissões negativas de CO₂ em 2040, é que na ausência de eliminação das emissões oriundas de desmatamento e mudança do uso da terra, o setor energético, precisará compensar parcialmente as emissões destas fontes e ao mesmo tempo lidar com as emissões remanescentes de GEE dos setores de difícil abatimento de emissões (*hard-to-abate*), como transporte de carga a longa distância e processos industriais carbono-intensivos, tornando a transição energética ainda mais onerosa e, portanto, um fator de perda de competitividade.

Caso o país não consiga eliminar o desmatamento ilegal até 2028, encontra-se uma *impossibilidade de viabilidade técnica e realista* para que as emissões de GEE sejam zeradas em 2050, mesmo considerado aplicação no fim do horizonte de tecnologias que hoje ainda não estão maduras.

Agropecuária, Florestas e Outros Usos do Solo

O segmento de Agropecuária, Florestas e Outros Usos do Solo (AFOLU) responde pela maior parte das emissões brasileiras (73% do total), sendo central para a viabilidade do alcance da neutralidade em carbono no país. Adicionalmente, o segmento apresenta um conjunto de opções atrativas de mitigação de baixo custo favorecendo uma transição energética de menor custo para o país.

O segmento dispõe de opções para remoção natural de carbono (chamadas de soluções baseadas na natureza – NBS), que além de remover carbono geram um conjunto de co-benefícios socioambientais. O Brasil detém grande potencial de NBS em seu território, respondendo por aproximadamente 20% deste potencial global. E, no caso brasileiro, é possível conciliar objetivos alimentares, energéticos e ambientais, por meio da conversão de 61-85 milhões de hectares de pastagens degradadas em florestas nativas, florestas energéticas plantadas e agropecuária sustentável.

Portanto, é muito relevante o papel redutor de emissões oriundo das mudanças positivas no uso da terra, com destaque para o reflorestamento e a restauração de florestas. Nesta frente, existe um nexo importante com a oferta de energia. Projeta-se, por exemplo, um crescimento entre 3-6 milhões de hectares de florestas plantadas (eucalipto e pinus) em áreas degradadas para atender à demanda por biomassa para a produção de biocombustíveis celulósicos a partir da rota BTL (*biomass-to-liquids*) em substituição aos combustíveis fósseis.

OFERTA DE ENERGIA

Geração Elétrica

Em todos os cenários projetados, projeta-se a expansão da capacidade de geração sendo respondida predominantemente pelas fontes eólica e solar, com consequente redução da participação relativa da hidroeletricidade, que se reduz para entre 30%-55% de participação na capacidade do parque gerador. Isto reflete por um lado as limitações à construção de novos projetos hidroelétricos com barragem em virtude do impacto ambiental e social causado e, por outro lado, a própria competitividade de outras fontes renováveis. Nesse sentido, a participação de fontes renováveis na geração elétrica brasileira continua a se ampliar, ultrapassando a marco de 90% do mix elétrico.

O crescimento da geração elétrica é acompanhado por uma consequente necessidade de expansão das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), para comportar o aumento do fluxo de eletricidade, crescendo entre 181-221 GW até 2050. Essa expansão ocorre tanto dentro dos subsistemas, quanto no intercâmbio de energia elétrica entre eles. Além disso, é considerado um aumento da eficiência nas novas instalações de transmissão e de distribuição de eletricidade, reduzindo as perdas no transporte.

Com um elevado potencial eólico e solar, pode aparentar que não existem desafios para que o setor elétrico contribua para as trajetórias de transição energética do Brasil. Entretanto, estes estão intrinsecamente ligados à pauta de modernização do setor. A modernização é necessária para suportar as mudanças na forma de operar o sistema e de transacionar a energia, que permitirão as mudanças necessárias valorização dos atributos das fontes e, portanto, na composição do sistema, para introdução de novas tecnologias e capacidades sem onerar, ou até mesmo com redução de custo para o consumidor.

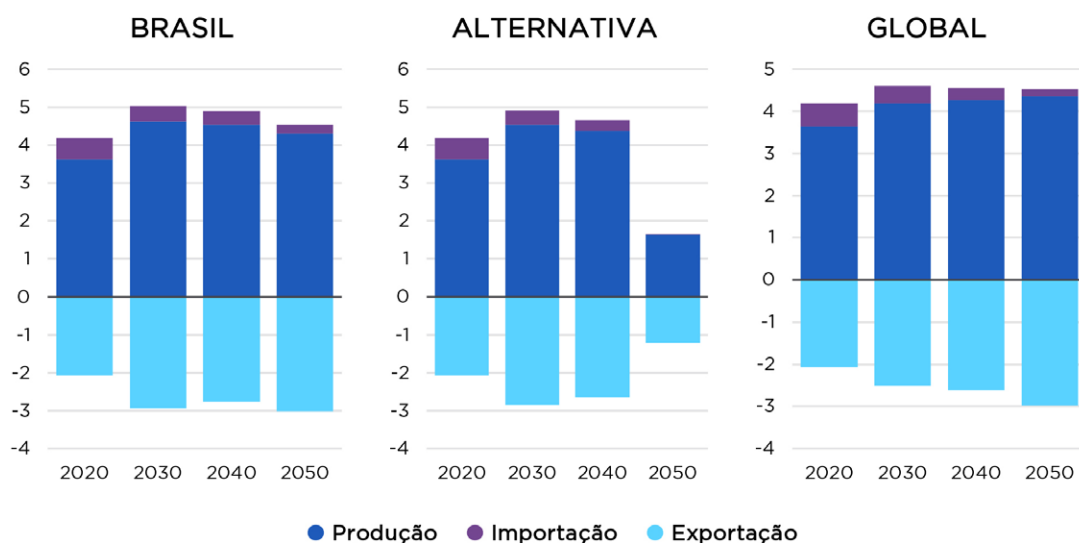
Petróleo, Gás Natural e Derivados

A demanda doméstica por petróleo e gás natural se reduz ao longo do horizonte, especialmente a de derivados de petróleo que se retrai fortemente no longo prazo devido à substituição por biocombustíveis e eletrificação dos transportes. Petróleo e gás natural passam a ser uma parcela menor da matriz energética brasileira, respondendo por cerca de 10%-25% do atendimento energético em 2050.

Contudo, a produção de petróleo brasileiro se mantém consistente ao longo do horizonte dos cenários, consolidando o país como um relevante exportador de petróleo. Isto se deve ao fato de o petróleo brasileiro apresentar tripla resiliência (técnica, econômica e ambiental), sendo um dos que tem menor intensidade de carbono no mercado internacional: enquanto a intensidade de carbono média do petróleo no mundo é de 22 quilos de CO₂ por barril de óleo equivalente produzido (KgCO₂/b), as de óleos do pré-sal estão abaixo de 10 kg CO₂eq/b. O estudo destaca a importância de manter este quadro de competitividade das reservas petrolíferas.

Dessa forma, o petróleo continua como vetor importante para atender a segurança energética de muitos países ao longo da transição energética. E, mesmo no longo prazo, cenários que projetam a neutralidade em carbono global indicam a manutenção de uma demanda remanescente por petróleo, a fim de satisfazer as demandas dos setores de difícil descarbonização e para fins não energético. Neste sentido, o petróleo brasileiro contribui para a mitigação das emissões globais de GEE ao deslocar O&G com maior intensidade de carbono no mercado global. Este fato será ainda mais relevante nos próximos anos devido ao aprofundamento da eficiência energética, eletrificação e remoção de carbono (CCUS e compensação florestal) no perfil de produção do O&G brasileiro.

PRODUÇÃO, EXPORTAÇÃO E IMPORTAÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL



Em relação ao gás natural, à semelhança do óleo, espera-se crescimento da produção em todos os cenários (a exceção é a última década do horizonte para o cenário TA). No entanto, há diferenças marcantes. Primeiro, a importação torna-se marginal, concentrada na importação por dutos (ou seja, da Bolívia) enquanto a importação de GNL é praticamente nula. Em segundo lugar, o aumento da produção é absorvido pelo mercado interno, sem a necessidade/dependência do mercado externo, suprimindo a crescente demanda interna nos setores industriais e residencial.

Como reflexo da redução do consumo doméstico de gasolina, diesel e outros derivados de petróleo, ocorrem relevantes mudanças na utilização do parque de refino. Com efeito, em 2050, ocorre uma queda no fator de utilização do refino. Adicionalmente, as refinarias passam a funcionar como biorrefinarias ou em complexos energéticos em uma lógica de requalificação de ativos alinhados à transição energética. De fato, em todos os cenários, o fator de utilização é majorado devido a introdução, em refinarias com capacidade de HDT e mesmo de FCC, de coprocessamento de óleo vegetal, óleo residual (UCOS) e óleo de pirólise, alcançando, em 2050, em torno de 10% de conteúdo de biomassa nos inputs do coprocessamento. Outra tendência observada é que no final do período as refinarias aumentam seu rendimento em produtos petroquímicos, refletindo o perfil de consumo de derivados de petróleo (para fins não combustíveis) em uma economia de baixo carbono.

Biocombustíveis

Nesse estudo, na busca pela neutralidade climática, além do etanol e biodiesel, ganham destaque os biocombustíveis avançados, produzidos por meio de diversas rotas tecnológicas, tais como: o diesel verde, o bioquerosene de aviação, a gasolina verde e os biocombustíveis para uso marítimo, que despontam como o principal vetor de substituição aos combustíveis fósseis.

A utilização de biocombustíveis avançados se expande por dois motivos principais: (i) descarbonização de segmentos do setor de transportes mais difíceis de serem eletrificados, como o aéreo, o marítimo e o transporte de cargas; (ii) captura e armazenamento do CO₂, que permitem gerar abatimento de emissões de outros setores.

Neste sentido, os biocombustíveis são uma opção estratégica para o país, já que existem determinados arranjos tecnológicos de produção de biocombustíveis que permitem alcançar emissões negativas, associadas à captura e armazenamento de CO₂ atmosférico (chamadas de BECCS), como a síntese do eucalipto ou pinus. A centralidade dos BECCS no alcance da neutralidade de carbono no país é evidenciada pelos volumes de carbono capturados, que alcançam 274 e 369 milhões de toneladas de CO₂, em 2050, nos cenários TB e TG, respectivamente.

Destaca-se que nas próximas três décadas, os biocombustíveis avançados (especialmente associados com CCS), podem configurar uma grande vantagem competitiva do Brasil, especialmente considerando a disponibilidade de terra, os rendimentos agropecuários favoráveis e a experiência nacional no tema. Os biocombustíveis avançados podem representar um investimento estratégico na transição para uma economia de baixo carbono para diversos setores, como o setor industrial, não só como energia, mas também como insumo para produção de petroquímicos.

Hidrogênio e Biometano

O hidrogênio apresenta uma versatilidade importante no contexto da transição energética, podendo ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo carbono em setores de difícil descarbonização ou como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada de renováveis.

A produção de hidrogênio no Brasil pode alcançar, em 2050, um potencial que varia entre 21-32 milhões de toneladas. Contudo, a maior parcela deste volume é obtida de forma indireta, isto é, o hidrogênio é obtido durante o processo de transformação energética como vetor intermediário para outras aplicações, tais como a produção de gás de síntese para combustíveis sintéticos finais e a utilização em células a combustível alimentadas por biocombustíveis.

Já o uso direto de hidrogênio utilizado domesticamente alcança volumes entre 0,6 e 1 milhão de toneladas nos cenários, produzido especialmente por meio da reforma do gás natural. Para o cenário TA, aparecem opções de produção a partir de energia renovável. Neste cenário também se projeta um potencial de exportação de hidrogênio verde (obtido pela eletrólise com eletricidade de fontes renováveis) da ordem de 4 milhões de toneladas em 2050.

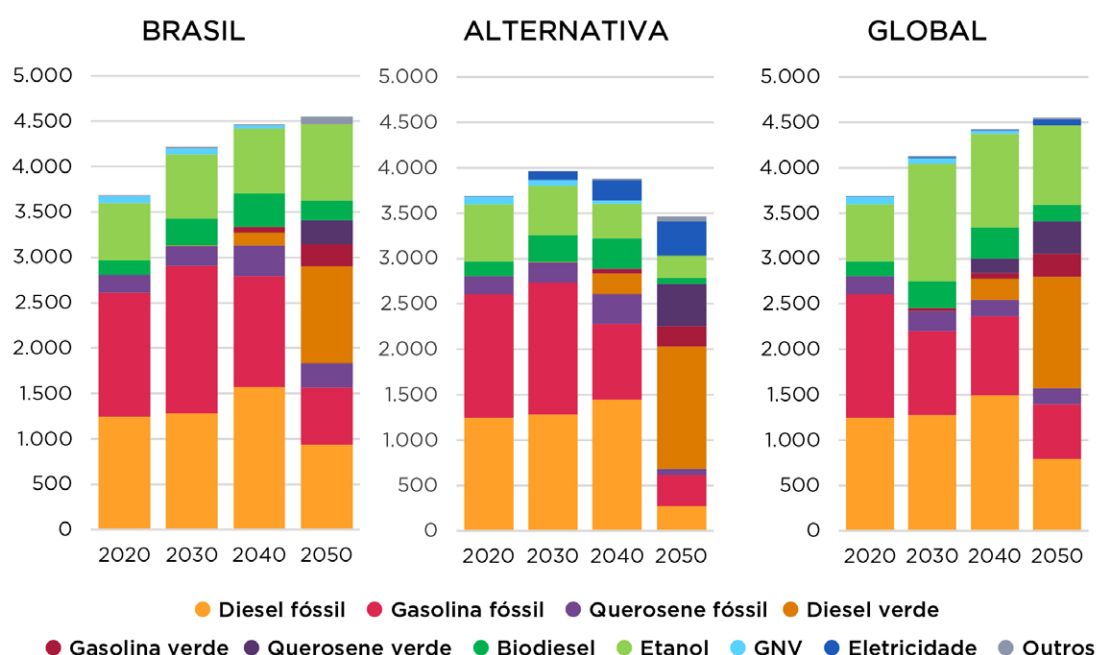
Outro combustível em estado gasoso com um importante papel a desempenhar nos cenários de transição energética é o biometano, que pode alcançar uma demanda entre 15-18 milhões de m³/dia em 2050. O biometano tem um papel de “descarbonizar” o gás natural, o que contribui para o aproveitamento da infraestrutura existente, potencializando o valor de térmicas e gasodutos.

Demanda por energia dos setores

Atualmente, as emissões decorrentes do uso de energia no Brasil correspondem apenas por 18% das emissões totais, sendo que os setores de transportes, industrial e residencial respondem por mais de 3/4 desta parcela das emissões. Os cenários indicam que a descarbonização desses setores enfrenta ao menos três grandes desafios: (1) a tendência esperada de crescimento na demanda por serviços energéticos, refletindo o crescimento populacional e econômico. Mesmo considerando uma parcela dos potenciais de eficiência energética, mantendo o padrão atual energético, a tendência seria de ampliação das emissões e não sua diminuição; (2) para algumas aplicações, as soluções tecnológicas para mitigar emissões ainda precisam de desenvolvimento e escala; e (3) seus custos de implantação ainda são elevados e mecanismos de financiamento e incentivo se mostram incipientes.

No segmento de transporte, o Brasil já se destaca globalmente, com uma participação de 25% de energias renováveis (biocombustíveis) em comparação aos menos de 5% na média mundial. A existência de uma indústria de biocombustíveis consolidada ao longo de décadas, uma rede de abastecimento de abrangência nacional e elevada participação de veículos flexfuel na frota, delinea uma vantagem competitiva para o país, que conta com soluções de descarbonização que antecedem em muitos anos o processo de eletrificação, movimento que vem ganhando tração em diversas regiões do mundo.

Como desdobramento, os biocombustíveis (especialmente os avançados a partir da década 2040) se configuram como o principal vetor de descarbonização do segmento de transporte no Brasil. Não obstante, como os movimentos e estratégias globais da indústria automotiva apontam cada vez mais para a introdução de veículos elétricos, os cenários apontam a eletrificação em nichos de mercado e de forma mais abrangente no cenário TA. Adicionalmente, os cenários chamam a atenção para as diferentes vertentes de eletrificação do transporte (que não apenas via veículos a bateria), de forma que é central desenvolver soluções nacionais que se insiram internacionalmente na cadeia global de valor da indústria automotiva, como, por exemplo, o desenvolvimento de veículos elétricos a célula combustível a partir de etanol e a disseminação da tecnologia híbrido flex para outros mercados.



O setor industrial contribui para as emissões totais do país tanto pela queima de combustíveis fósseis quanto por seus próprios processos produtivos. Ganhos de eficiência e maior penetração de gás natural e biomassa se apresentam como os principais vetores de descarbonização nos cenários. O maior desafio deste segmento é encontrar soluções para as áreas de metalurgia e fabricação de cimento, que respondem pela maior parte das emissões do setor e apresentam emissões que são intrínsecas a seus próprios processos de produção, demandando tecnologias disruptivas de descarbonização.

No setor residencial e de serviços projeta-se um crescimento de aproximadamente 60% na demanda energética, refletindo o aumento da renda média, ampliação da posse de equipamentos eletrônicos e digitalização de atividades, bem como a ampliação no número de unidades consumidoras. Para atender a este crescimento com redução de emissões, a eletricidade se consolida como a fonte mais importante. Adicionalmente, os cenários apontam para uma forte substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP) pelo gás natural para as aplicações de cocção de alimentos e aquecimento, fazendo com que a demanda de gás natural quase que decupla entre 2020 e 2050 neste setor. ■

Introdução

2

O Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética (PTE) foi estabelecido a fim de avaliar os condicionantes e as potencialidades da transição energética no Brasil, e contribuir, de forma independente e aberta, com a formulação de políticas públicas para a matriz energética brasileira de 2050. Particularmente, ao envolver discussões e participação de diferentes *stakeholders*, o Programa visou desde o início contribuir para a formação de consensos mediante o detalhamento da análise de incertezas críticas, explorando cenários e sensibilidades. Assim, este relatório reflete os resultados do processo de construção e desenvolvimento de cenários e seu rebatimento quantitativo (projeções) e não necessariamente a visão das instituições que participam do Programa de Transição Energética.

Unindo, de forma inovadora, o Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI), o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o programa buscou sobretudo situar o Brasil no processo, que ocorre a nível global e de forma concomitante, de compreensão pela sociedade das consequências da mudança climática e de evolução no desenvolvimento de tecnologias que viabilizam a produção de energia sustentável, e para tal, foi dividido em três fases: diagnóstico, convergência e desenvolvimento de cenários.

FASE 1

A **fase de diagnóstico**, ocorrida no 1º semestre de 2021, teve como objetivo o mapeamento das principais tendências e incertezas críticas através de uma série de eventos virtuais, em debates com especialistas, público e partes interessadas, e resultou no lançamento de um *whitepaper* consolidando as percepções obtidas em dezembro desse mesmo ano.

As perguntas norteadoras da fase 1 foram:

A.

Quais os efeitos estruturais que a pandemia pode provocar sobre o setor energético global e quais os seus desdobramentos para o Brasil?

B.

Que tecnologias e fontes de energia fazem mais sentido para o Brasil na busca pelo atendimento aos acordos climáticos?

C.

Quais alternativas de transição energética trazem maiores benefícios para o Brasil? Qual a contribuição de cada um dos segmentos para esse processo?

FASE 2

A **fase de convergência** se iniciou no 2º semestre de 2021 buscando consolidar uma visão de futuro para as principais variáveis explicativas identificadas na fase anterior.

FASE 3

A **fase de desenvolvimento de cenários**, onde foram modelados os cenários de futuro com base na metodologia adotada pelo grupo Cenergia/PPE/COPPE/UFRJ e cujos resultados apresentaremos nesse documento.

Cenários de Transição Energética para o Brasil

O objetivo deste Programa de Transição Energética é identificar trajetórias de neutralidade de carbono para o Brasil. Para tanto, foram elaborados três cenários distintos que convergem para a emissões líquidas nulas de gases de efeito estufa (GEE) no país, no horizonte de 2050, intitulados: (i) Transição Brasileira (TB); (ii) Transição Alternativa (TA) e (iii) Transição Global (TG).

Nos cenários TB e TA, as emissões líquidas nulas de todos os gases de efeito estufa são alcançadas em 2050, o que implica zerar as emissões de CO₂ em torno de 2040. No cenário TG, a trajetória de redução das emissões está associada ao orçamento de carbono global (400 Gt CO_{2eq}) disponível para atender o limite de aumento da temperatura global em até 1,5°C. Adotando uma alocação mundial conforme o mínimo custo global, obtém-se um orçamento de carbono para o Brasil de 13,2 GtCO_{2eq} entre 2010-2050, o que resulta alcançar emissões líquidas nulas de todos os gases de efeito estufa poucos anos depois de 2050, mas com as emissões de CO₂ sendo zeradas um pouco antes de 2040.

Como veremos, para alcançar o objetivo de neutralidade em carbono, será imperativo uma mudança de rumo em determinados padrões, bem como impulsionar e/ou desenvolver tecnologias necessárias para o ritmo de descarbonização pretendido.

TABELA 1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CENÁRIOS

	TRANSIÇÃO BRASIL	TRANSIÇÃO ALTERNATIVA	TRANSIÇÃO GLOBAL
Ambiente internacional	Cooperação limitada ("blocos regionais")		Cooperação global ("Vila global")
Contexto nacional	Processo de transição definido a partir do contexto brasileiro		Processo de transição inserido em um contexto mundial
Abordagem	Mínimo custo para NetZero GEE	Mínimo custo, com restrições de CCS e disponibilidade hídrica e premissa de produção de hidrogênio e nuclear	Mínimo custo para um ótimo global 1,5°
Cadeias globais de produção	Orientação mais regional da produção		Nacionalização de segmentos estratégicos
Orçamento de Carbono (2010-2050)	24,3 GtCO ₂	24,9 GtCO ₂	15,3 GtCO ₂
Neutralidade de emissões no Brasil	CO ₂ em 2040 GEE em 2050	CO ₂ em 2040 GEE em 2050	CO ₂ em 2035 GEE em ~2050

A fim de dimensionar quais são as ênfases de recomendações de políticas e a magnitude dos investimentos dos agentes privados que emergem destes três cenários de neutralidade em carbono, apresentamos um exercício tendencial, *Business As Usual* (BAU), que considera as políticas e ações correntes relativas aos setores do sistema energético e no segmento de mudanças no uso do solo, como:

- i. Capacidades instaladas atuais e contratadas para fontes de geração elétrica, refinarias, destilarias, ativos de transmissão e de distribuição de energia elétrica;
- ii. Finalização da usina nuclear Angra 3 entre 2025 e 2030;
- iii. Continuidade da operação da termoeletrica a carvão mineral Jorge Lacerda até 2040;
- iv. Implementação da mistura obrigatória de biodiesel em 20% (base volumétrica, B20) a partir de 2028;
- v. Objetivos de descarbonização da *International Maritime Organization* (IMO) e da *International Air Transport Association* (IATA) com metas de redução de emissões de 50% em 2050, relativo às emissões de 2008 e de 2005, respectivamente;
- vi. Tecnologias de produção agrícola atuais e o cumprimento do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC);
- vii. Redução do desmatamento ilegal ao patamar mínimo histórico de 400 mil hectares-ano, tanto nos biomas Cerrado quanto Amazônia, a partir de 2028 e até o fim do período.

3.1. Cenário Transição Brasileira (TB)

O cenário Transição Brasileira é moldado com base nos compromissos assumidos pelo país em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), buscando indicar a trajetória ótima custo-eficiente (com base nos recursos, conhecimento e nas expectativas de custos futuros) para Brasil alcançando a neutralidade líquida em carbono em 2050.

Neste cenário, o Brasil alcança a neutralidade independente das ambições e compromissos dos demais países. De fato, em um mundo onde prevalece a falta de cooperação e de uma governança global para a transição energética, o Brasil emerge como uma potência verde no cenário internacional, melhorando de forma significativa sua imagem frente aos investidores estrangeiros. Com isso, o país volta a figurar entre as economias com grandes e interessantes oportunidades para alocação de capital.

Os acordos multilaterais internacionais para a transição para uma economia de baixo carbono, inclusive a COP, têm dificuldades para alinhar interesses e coordenar as ações necessárias para manter as metas acordadas durante a COP21. As discussões

Em um mundo onde prevalece a falta de cooperação e de uma governança global para a transição energética, o Brasil emerge como uma potência verde no cenário internacional, melhorando de forma significativa sua imagem frente aos investidores estrangeiros.

e o engajamento não cessam, mas as questões relacionadas ao financiamento da transição energética e aos conflitos entre os países dos blocos ocidental e oriental, dificultam a construção de consensos e as tomadas de decisões em fóruns globais.

Esse cenário é caracterizado por retrocessos importantes no que diz respeito à agenda ambiental e climática global. Não há consenso em torno do que seria uma transição justa

do ponto de vista da distribuição das responsabilidades e esforços para o alcance dos compromissos e metas estipulados no Acordo de Paris. Com o enfraquecimento da coordenação global, surgem algumas lideranças regionais que vislumbram oportunidades de impulsionar seus ritmos de crescimento econômico a partir do aproveitamento dos potenciais em segmentos de baixo carbono. O Brasil seria uma dessas lideranças, que passa a colocar a política energética e ambiental no centro da discussão do modelo de crescimento econômico.

Nessa linha, muitos países optam por estratégias domésticas de transição, buscando soluções nacionais e apostando nas melhores rotas tecnológicas para suas capacidades e recursos. É o caso do Brasil, que define como meta o alcance da neutralidade das emissões para 2050. Embora continue participando dos fóruns internacionais, o caminho escolhido é determinado internamente a partir de uma meta definida e divulgada pelo governo brasileiro em 2022. A escolha por um caminho nacional parte de um maior entendimento da sociedade de que o Brasil deve se posicionar como um dos líderes do processo de transição energética, mas por meio de uma estratégia e escolhas que se apoiem em suas competências e recursos, de forma a materializar suas vantagens energéticas em oportunidades que proporcionem crescimento econômico, modernização tecnológica, ampliação dos investimentos e geração de emprego e renda. Nesta transição brasileira, de forma geral, observa-se

a formação de convergências, uma forte articulação entre setor público e privado, com coordenação de políticas, *roadmap* de longo prazo e investimento. A opinião pública fortalece a formação de consensos em prol da estratégia de transição e o setor financeiro suporta uma trajetória de transição custo-eficiente.

A sociedade brasileira passa por um processo profundo de transformações que integra a transição energética dentro de um paradigma de desenvolvimento social e humano. Os recursos públicos, inclusive aqueles que têm como origem as rendas do setor de óleo e gás, são destinados à ampliação da educação, da transformação tecnológica, e a criação de um ambiente que incentive a inovação e a economia de baixo carbono.

Além disso, lideranças políticas de espectros ideológicos e partidários distintos convergem para os potenciais ganhos para a economia e sociedade brasileira decorrentes da adoção de medidas que estimulem principalmente os investimentos em fontes renováveis. Neste sentido, nas discussões de orçamento público, por exemplo, priorizam-se ações de natureza tributária e fiscal para o desenvolvimento da economia verde brasileira. Ademais, vale dizer que neste cenário há um grande engajamento da sociedade civil nas questões ambientais e climáticas, que passa a perceber os benefícios de um reconhecimento internacional do Brasil como uma liderança no desenvolvimento de uma economia de baixo carbono.

Neste contexto, cria-se um alinhamento entre distintos grupos econômicos em defesa da consolidação de um modelo de crescimento impulsionado pelos investimentos em descarbonização. Do ponto de vista da gestão de política pública, os responsáveis pela definição dos incentivos governamentais baseiam-se em análises técnicas, buscando incentivar aqueles segmentos e tecnologias mais adequadas à realidade brasileira do ponto de vista de seu custo-benefício.

A convergência em torno de um modelo de crescimento baseado na descarbonização da economia é fundamental para minimizar as instabilidades políticas e institucionais no país. Com isso, cria-se um ambiente de negócios bastante propício aos investimentos para a consolidação de uma infraestrutura verde voltada a atender as necessidades da própria economia brasileira.

A trajetória visando emissões líquidas zeradas de GEE em 2050 inclui:

- i. A soma das emissões de GEE provenientes de todas as fontes e setores da economia, ou seja, toda a emissão remanescente do país, deverá ser compensada por tecnologias ou meios de remoção de GEE da atmosfera, como é o caso do reflorestamento e captura e armazenamento de carbono (*carbon capture and use or storage* – CCUS);
- ii. Apresenta uma restrição na trajetória de emissões de GEE, o que resulta em inovações e rupturas tecnológicas, como forma de atingir a neutralidade de emissões no país em 2050; e
- iii. Assume também uma trajetória de desmatamento zero a partir de 2028 e os objetivos de descarbonização da IMO e da IATA, a partir de 2023.

3.2. Cenário Transição Alternativa (TA)

No cenário Transição Alternativa (TA) busca-se testar uma trajetória tecnológica alternativa para o alcance da neutralidade de emissões no Brasil em 2050, considerando os impactos da própria mudança climática no setor energético e, principalmente, as incertezas do processo de difusão de novas tecnologias. Trata-se de uma variação do cenário Transição Brasileira (TB), no qual se impõe maiores restrições, de forma a limitar ou induzir a escolha de rotas tecnológicas pelas quais o processo de transição tomará forma.

Nesse cenário simula-se uma trajetória alternativa impactada por: (i) uma menor geração de energia hidrelétrica; (ii) maior capacidade de geração nuclear; (iii) inviabilização econômica das soluções de captura e estocagem de carbono; (iv) maior uso de biometano; (v) maior eletrificação da frota de veículos leves e pesados para transportes de passageiros e cargas.

A transição energética brasileira também alcança a neutralidade líquida das emissões em 2050, nesse cenário. Da mesma forma que no cenário TB, essa trajetória é sustentada por consensos em torno de uma estratégia de transição que alinhem neutralidade em carbono com desenvolvimento econômico. No entanto, na formação deste consenso, grupos organizados de setores específicos se destacam, buscando

Nesse cenário, a transição energética brasileira também alcança a neutralidade líquida das emissões em 2050.

induzir investimentos em determinadas soluções de descarbonização. Com efeito, busca-se apontar uma trajetória alternativa para fazer frente aos riscos e incertezas da evolução tecnológica inerente ao processo de transição energética.

Considerando que estas rotas tecnológicas não foram escolhidas (ou selecionadas com menor intensidade) no exercício de otimização original (cenário TB), isso implica que uma maior participação será motivada por restrições adicionais e direcionada por políticas públicas, como a promoção de maior eletrificação da frota de veículos, maior produção de hidrogênio destinado à exportação e maior geração nuclear, por exemplo. As legislações, incentivos tributários, e os investimentos públicos serão associados a determinadas tecnologias. O Estado atua na cocriação e coestruturação dos mercados, alinhando os instrumentos disponíveis como compras públicas e tributação.

A percepção é de que o Brasil, devido a seus recursos naturais, deve liderar certas tecnologias, sendo ator ativo de seu desenvolvimento, garantindo posição privilegiada para apropriação das rendas geradas com os negócios da transição energética. Essa liderança também tem como fundamento alavancar o desenvolvimento do país. Nesse cenário, os setores tradicionais perdem espaço e o setor de óleo e gás, em especial, tem um papel menor no processo de transição.

O cenário TA se diferencia por restrições climáticas ou tecnológicas e escolhas de política energética e tecnológicas como:

- a. Redução no potencial de geração das hidrelétricas, a fim de representar uma menor disponibilidade para despacho, que poderia ser decorrente da oposição social a novas plantas com grandes barragens/reservatórios, seus custos ambientais e, principalmente, dos períodos mais acen-

tuados de secas como reflexo das mudanças climáticas ou de alterações mesoclimáticas em curso no país ou conflitos pelo uso múltiplo da água. Essa restrição representa uma redução do fator de capacidade das hidrelétricas, na média, em 17% para pequenas e 32% para grandes, variando entre as regiões do país¹.

TABELA 2. VARIAÇÃO DOS FATORES DE CAPACIDADE

	HIDRELÉTRICA MÉDIA		HIDRELÉTRICA GRANDE	
	Cenário TB	Cenário TA	Cenário TB	Cenário TA
Sul	54%	53%	54%	49%
Sudeste	54%	47%	59%	43%
Centro-Oeste	54%	47%	59%	45%
Nordeste	54%	38%	54%	31%
Norte	54%	39%	49%	29%

- b. A energia nuclear pode contribuir de forma relevante no abatimento de emissões de GEE, bem como ampliar a resiliência da robustez dos sistemas elétricos do país durante a transição energética. Neste sentido, considerou-se uma ampliação de potência adicional instalada de usinas nucleares em 4 GW em 2050, de forma a atingir neste ano uma capacidade total de 8 GW²;
- c. Dificuldades competitivas à adoção de tecnologias de captura e armazenamento ou uso de carbono, a fim de verificar as implicações para o sistema energético sem a disponibilidade dessas alternativas;
- d. Brasil será competitivo no hidrogênio de baixo carbono e responderá por cerca de 10% do mercado internacional, alcançando exportação de 4 milhões de toneladas de hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água, em 2050³;
- e. Brasil será competitivo no aproveitamento de biometano pelo mercado doméstico, chegando a 10 milhões de Nm³/dia de Biometano a partir de 2030⁴;

1. Tais reduções se basearam no trabalho de Vasquez-Arroyo et al., (2020) e na "Quarta Comunicação Nacional Do Brasil À Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas" (MCTI, 2020).

2. Utilizou-se com referência o PNE 2050, em que são feitos dois exercícios considerando uma política energética definindo uma inserção de 8 GW a 10 GW de usinas termonucleares. Foram simulados dois casos: 1. Redução de 50% do CAPEX e do OPEX, que resulta em cerca de 20GW até 2050; 2. Política pública de expansão de UTN de 8GW a 10 GW até 2050, com base nos objetivos da Política Nuclear Brasileira (decreto 9.600/2018).

3. Para adoção desta premissa utilizamos como referência o estudo McKinsey (2021), Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. O estudo aponta que o Brasil tem potencial para disputar competitivamente uma fatia dos mercados de importação dos Estados Unidos e da União Europeia e pode capturar USD 1 a 2 bilhões até 2030. As exportações podem chegar a USD 4 a 6 bilhões, ou 2 a 4 milhões de toneladas, em 2040. Como o patamar de 4 milhões de toneladas é considerado em uma trajetória de crescimento acelerado da produção, no cenário TA considerou-se o alcance deste patamar de volume exportado em 2050. Ver <https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>

4. Tomou-se como referência o PDE 2030 que apontou um potencial de 3,8 bilhões de Nm³ de biometano (igual a 10 M Nm³/dia), em 2030, a partir vinhaça e torta de filtro com base nas projeções de produção de etanol e açúcar. Ver Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, página 268. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf

- f. Premissas de eletromobilidade estabelecidas conforme o relatório “*Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector*” da Agência Internacional de Energia (IEA) (IEA,2021). Os valores da IEA foram deslocados em 10 anos, representando uma defasagem na introdução de tecnologias no mercado nacional, em comparação à velocidade de implementação global.

3.3. Cenário Transição Global (TG)

O Cenário Transição Global busca destacar a contribuição do Brasil em um mundo que pretende limitar o aumento médio da temperatura superficial global em até 1,5°C em 2100, referente aos níveis pré-industriais. Considera-se a urgência e a necessidade imediata de redução de emissões de GEE, para se garantir o atingimento das metas do Acordo de Paris (MCTIC, 2015). Dessa forma, neste cenário, o Brasil é responsável por uma parte do orçamento de carbono mundial. Em um orçamento global de carbono de 400 GtCO₂, considerando uma alocação entre os países conforme o mínimo custo global, obteve-se um orçamento de carbono para o Brasil entre 2010-2050 que equivale a 13,2 GtCO₂ entre 2010-2050.

O processo de transição energética brasileiro está integrado e subordinado à dinâmica dos acordos internacionais, sendo a COP o principal organismo direcionador das medidas globais para redução dos gases do efeito estufa.

Nesse cenário, liderados por China, EUA e Europa, os países chegam a um consenso sobre a melhor forma de distribuir os esforços necessários para atingir as metas traçadas pela COP. Do ponto de vista da geopolítica internacional, as questões ambientais e energética tornam-se um

Do ponto de vista da geopolítica internacional, as questões ambiental e energética tornam-se um pilar fundamental de um processo de maior convergência entre as potências ocidentais e orientais, a despeito da continuidade da disputa hegemônica em sentido mais amplo.

pilar fundamental de um processo de maior convergência entre as potências ocidentais e orientais.

Há, portanto, uma amenização da tensão atual entre EUA e Europa Ocidental de um lado, e Rússia e China de outro, explicada pela maior coordenação dos esforços ambientais e climáticas das principais potências. As autoridades internacionais na área climática e energética

obtêm êxito em demonstrar aos formuladores das políticas públicas nestes países que a fragmentação do mundo e a redução nas trocas comerciais e tecnológicas voltadas ao desenvolvimento da economia de baixo carbono retardariam em décadas a transição energética, podendo provocar novas tensões sociais, além de efetivamente ameaçar a sobrevivência do planeta.

Além disso, a pandemia e o conflito entre Ucrânia e Rússia trazem o aprendizado sobre a necessidade de coordenação das ações planejadas no âmbito do processo de transição. Essa necessidade aponta como ponto fundamental os estímulos aos investimentos e as adequações da capacidade de oferta energética, para que esse

processo não seja marcado pela inflação nos preços de energia e, nesse sentido, um processo que aumente as desigualdades regionais.

Em síntese, os referidos *stakeholders* promotores da aceleração da transição energética conseguem evitar que ocorra de fato uma reversão na dinâmica dessa transição, no médio prazo, sendo decisivos na coordenação de interesses do equilíbrio de poder entre as potências globais.

No Brasil, o cenário se caracteriza por uma maior coordenação entre os formuladores de políticas públicas nas áreas econômica, energética e ambiental. Esses atores conseguem colocar em prática as medidas necessárias para o alcance das metas estipuladas pelos acordos globais. Nessa realidade, as autoridades brasileiras buscam um efetivo combate ao desmatamento ilegal em linha com os anseios e as ações de relações internacionais (negociações de acordos, instrumentos e condicionantes de acesso a mercados, contrapartidas comerciais ou de investimentos, representatividade em estruturas multilaterais, organizações ou iniciativas etc.). Adicionalmente, o Brasil adota o modelo *cap-and-trade* como referência para a implementação do mercado nacional de carbono.

Neste cenário, a amistosidade e receptividade brasileira nas relações diplomáticas na área energética e ambiental deixa o país em grande evidência internacional, conseguindo atrair volumes expressivos de investimento direto estrangeiro de múltiplos países, com foco no desenvolvimento do potencial brasileiro nas fontes renováveis, tecnologias de baixo carbono e de remoção de carbono.

Mesmo não sendo uma restrição do modelo o alcance da neutralidade de carbono em 2050, considerando o tamanho e perfil de emissões atual, o Brasil teria que convergir para a neutralidade de carbono no horizonte de 2050. ■

Resultados Gerais

4

4.1. Matriz Energética

O Brasil é um país que está avançado em sua transição energética. Com uma matriz energética onde aproximadamente metade da sua energia primária é oriunda de fontes renováveis (49% em 2020) - fruto da expressiva participação de fontes renováveis modernas, tanto na matriz elétrica, quanto na matriz de combustíveis - o país se caracteriza como uma das matrizes mais convergentes para uma economia de baixo carbono, com uma renovabilidade três vezes acima da média mundial (14% em 2019).

Não obstante, a análise das trajetórias de descarbonização para os próximos 30 anos, apresentadas nos cenários, mostram dinâmicas para matriz energética distintas das observadas nos últimos 30 anos e, também, das políticas energéticas em curso (exercício BAU), refletindo a necessidade de novos instrumentos e vetores energéticos a fim de alcançar a ambição climática de neutralidade em carbono.

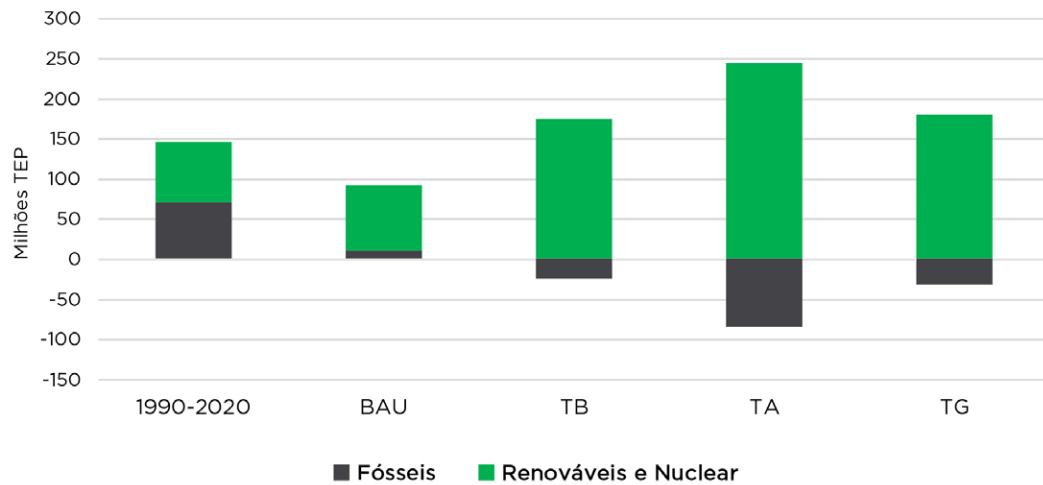
Entre 1990-2020, a oferta primária cresceu em média 2%, um incremento de 146 milhões de tep, suprido de forma balanceada por fósseis e renováveis.

Entre 1990-2020, conforme pode ser visto no gráfico, a oferta primária de energia no Brasil cresceu em média 2%, um incremento de 146 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo), suprido de forma balanceada por fósseis e renováveis. Até 2050, a oferta pri-

mária irá se expandir entre 149-161 milhões de tep, a depender do cenário de neutralidade, com todo o suprimento oriundo de fontes renováveis, adicionalmente ao deslocamento de fontes fósseis que podem variar de 24-84 milhões de tep.

GRÁFICO 1

VARIAÇÃO DA OFERTA PRIMÁRIA DE ENERGIA NO BRASIL (2020-2050)

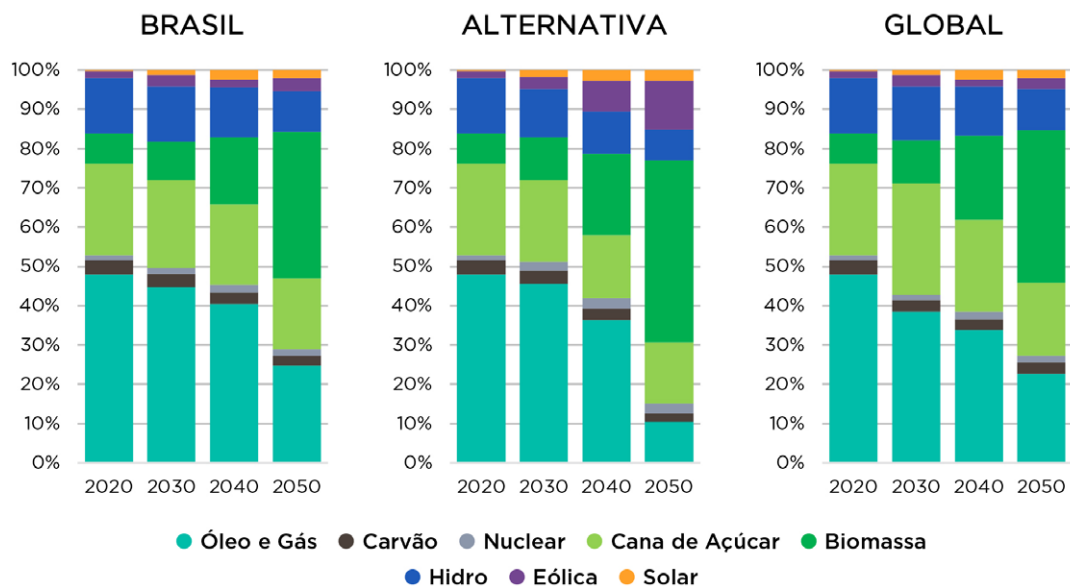


Nos cenários de neutralidade de carbono elaborados pelo estudo, a demanda de energia primária se eleva acima de 400 milhões de tep até 2050, em um crescimento anual médio de 1,5%, taxa que corresponde a pouco mais da metade do verificado nos últimos trinta anos. O crescimento econômico e populacional são vetores importantes para a elevação no consumo de serviços energéticos, enquanto os ganhos de eficiência atuam como instrumentos de abatimento de demanda.

Os três cenários estudados apresentam perfis distintos de matriz energética primária, tanto no total ofertado quanto nas fontes utilizadas. No entanto, em todos os cenários há queda da utilização de combustíveis fósseis em 2050 e aumento do uso de fontes renováveis conforme pode ser visto no gráfico abaixo.

GRÁFICO 2

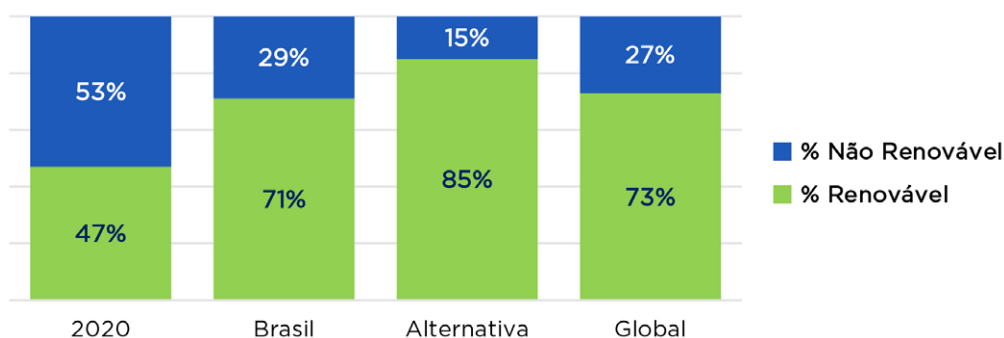
USO DE ENERGIA PRIMÁRIA POR FONTE NO BRASIL



Ao longo do horizonte de projeção, o perfil da demanda varia significativamente, com as fontes renováveis superando os 70% em todos os cenários de neutralidade climática, conforme ilustrado no gráfico a seguir, *Participação das fontes renováveis e não renováveis no Brasil*. Essa mudança é liderada pelo crescimento da biomassa, fonte que mais ganha participação na matriz energética brasileira, seguida por eólica e solar. A biomassa tem um papel de destaque na descarbonização do setor de transportes, sobretudo na substituição de diesel e QAV de origem fóssil, mas também, nos cenários TG e TB, como um instrumento de alcance de emissões negativas, com tecnologias BECCS, *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* (ver seção Biocombustíveis).

É importante ressaltar que a utilização de biomassa nesses cenários não se trata somente da competitividade das tecnologias de transportes, mas da solução de otimização sistêmica no contexto de descarbonização da economia. É necessário atender a demanda por vários combustíveis líquidos, nafta petroquímica, GLP, ao mesmo tempo em que se torna necessário compensar emissões de GEE de setores de difícil abatimento, como aviação, transporte marítimo e transporte de carga a longa distância⁵. A escolha pelos biocombustíveis drop-in permite o uso da infraestrutura existente para transporte e distribuição dos combustíveis, além do aproveitamento e uso direto na frota de veículos. Dessa forma, não há a necessidade de renovação de frota devido à troca de tecnologia no setor de transportes, e há uma menor necessidade de expansão de usinas elétricas e da infraestrutura de transmissão e distribuição de eletricidade. Além disso, a produção dos biocombustíveis se beneficia da economia de escopo, uma vez que a produção dos combustíveis verdes ocorre de forma conjunta, ou seja, a produção do diesel verde vai acarretar na produção de querosene, gasolina e óleo pesado verdes. Sendo assim, é observada a descarbonização de todos os segmentos do setor de transportes, o que a modelagem integrada consegue enxergar como uma medida custo-efetiva (ver Müller-Casseres *et al.*, 2021, 2022, Oliveira *et al.*, 2021).

GRÁFICO 3 PARTICIPAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL, EM 2050



5. No caso dos cenários com BECCS (TG e TB), o modelo opta pela solução de biocombustíveis em rotas onde a captura é mais fácil (BTL e etanol de 2ª geração). Com isso, compensa emissões residuais de derivados de petróleo, sobretudo. Por sua vez, no caso do cenário sem BECCS (TA), o modelo precisa da rota Fischer-Tropsch (senão ela, a rota alternativa de *Alcohol-to-Jet* e *Alcohol-to-Diesel*) para produzir combustíveis capazes de antecipadamente substituir QAV e diesel mineral. Portanto, para se obter emissões líquidas nulas, o modelo precisa substituir, neste caso, derivados em setores de difícil abatimento.

As fontes eólicas e solar também desempenham papel importante nas trajetórias de descarbonização, de forma mais expressiva em termos de capacidade instalada do que de energia gerada (ver seção Setor Elétrico). A energia eólica, por seu turno, ganha especial relevância no cenário TA para suprir um setor de transportes mais eletrificado que nos demais cenários.

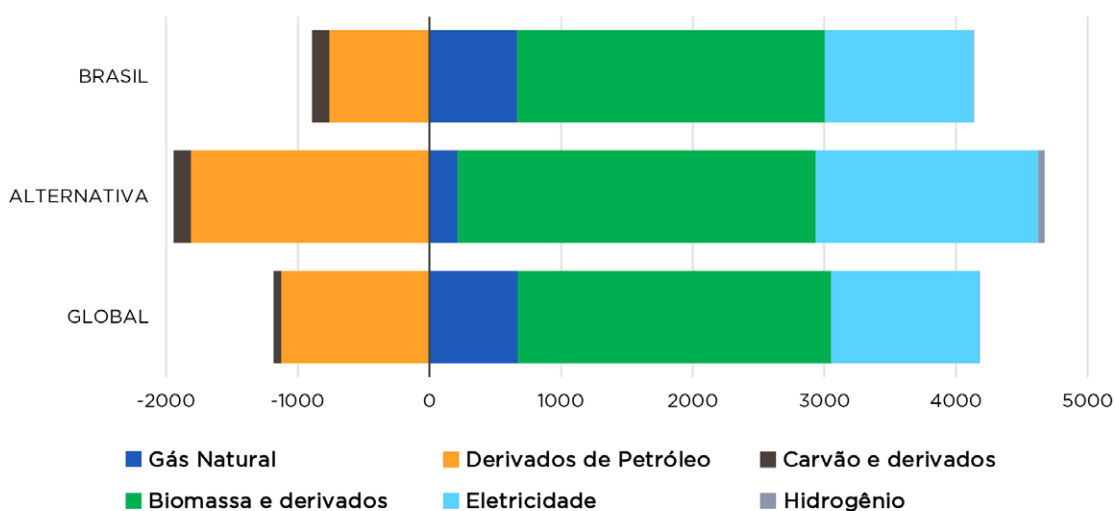
Já o petróleo é a fonte que mais reduz participação em todos os cenários, chegando, no cenário TA, a responder por apenas 5% da matriz em 2050. Isso decorre da premissa de desafios de competitividade nesse cenário para uso de tecnologias de captura e armazenagem de carbono (CCS), que viabilizam emissões negativas nos demais cenários de neutralidade climática. Assim, sem CCS, o espaço para o uso de derivados de petróleo se reduz, tornando necessária a antecipação de rotas de produção de combustíveis celulósicos.

Essa é uma sinalização clara da necessidade de se reduzir o consumo de combustíveis fósseis em cenários de transição energética, substituindo-os por combustíveis renováveis. Isso indica a importância de se implementar estratégias relevantes de pesquisa e desenvolvimento nacional, associadas a combustíveis celulósicos e CCS. Esse resultado é corroborado pela Agência Internacional de Energia em seu relatório Net Zero by 2050 (IEA, 2021), que evidencia a necessidade de redução de aproximadamente 80% da energia fóssil consumida atualmente, com repercussões consideráveis sobre as refinarias de petróleo.

As fontes 'hidráulica' e 'derivados da cana-de-açúcar', que se destacam no presente por conferirem à matriz energética brasileira seu caráter fortemente renovável, passam a dividir seu protagonismo com outras biomassas. Embora essas fontes tradicionais percam participação no horizonte de análise, crescem de forma absoluta em todos os cenários.

O gráfico a seguir detalha a variação da energia primária por fonte, em milhares de Tep, entre 2020 e 2050.

GRÁFICO 4 VARIAÇÃO ACUMULADA DA ENERGIA PRIMÁRIA (2050-2020)



4.2. Emissões

Em 2020, o Brasil emitiu 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq), figurando entre os principais emissores globais anuais. Contudo, em termos per capita, o Brasil é considerado um país de baixa intensidade de emissões com cada brasileiro emitindo, em média, 1,9 tCO₂eq. Isso representa cerca de 1/7 das emissões de um norte-americano e 1/3 de um cidadão europeu ou de um chinês.

A particularidade do Brasil é que a geração de GEE do país não está fortemente relacionada à geração de energia, mas sim às mudanças no uso da terra (desmatamento) e agropecuária, que, juntas, representam 73% das emissões totais no país. Enquanto no mundo, o setor energético é responsável por 76% das emissões de GEE, no Brasil a matriz energética corresponde a 18% das emissões brutas de GEE do país em 2021 (SEEG, 2022). Isso ocorre, pois quase metade da matriz energética brasileira é oriunda de energias renováveis.

As emissões decorrentes da energia no Brasil alcançaram 393,7 milhões de tCO₂eq em 2020 (SEEG, 2021). A desagregação setorial das emissões derivadas da energia permite entender melhor a contribuição de cada segmento de consumo para o sucesso das metas climáticas. Com efeito, Transportes (47%), Produção de Combustível (18%) e Geração Elétrica (8%), e Indústria (17%) respondem por quase 90% das emissões do uso energético no Brasil.

A descarbonização desses segmentos enfrenta ao menos três grandes desafios. O primeiro decorre da tendência esperada de crescimento na demanda de serviços energéticos em cada um desses segmentos, ou seja, mantendo tudo como está, a tendência seria de ampliação das emissões e não de diminuição. Segundo, para algumas aplicações as soluções tecnológicas ainda precisam de desenvolvimento e escala e, por último, mas não menos importante, seus custos de implantação ainda

são elevados e mecanismos de financiamento e incentivo ainda se mostram aquém do necessário.

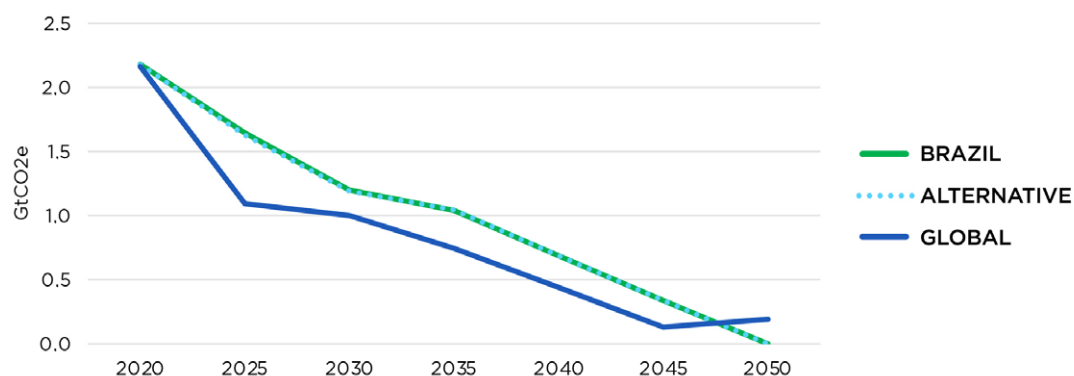
Os três cenários de descarbonização incorporam as mudanças estruturais para os setores de oferta e demanda de energia necessárias para uma transição energética que resulte em neutralidade climática no Brasil na década de 2050.

Os três cenários de descarbonização incorporam as mudanças estruturais para os setores de oferta e demanda de energia necessárias para uma transição energética que resulte em neutralidade climática no Brasil na década de

2050. Como resultado de todo o esforço de mitigação, as emissões de GEE no país atingiriam a redução desejada. Com isso, seriam evitadas aproximadamente 30 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente no horizonte e seriam alcançadas emissões líquidas zero em 2050 para os cenários TB e TA, conforme pode ser visto no gráfico a seguir, *Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)*. Para o cenário TG, em que as emissões brasileiras fazem parte de um esforço global coordenado compatível com aumento de temperatura de 1,5°C até 2100, o esforço de mitigação de emissões é ainda maior, alcançando cerca de 40 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente no período, embora emissões líquidas nulas ocorram ao longo da década de 2050.

GRÁFICO 5

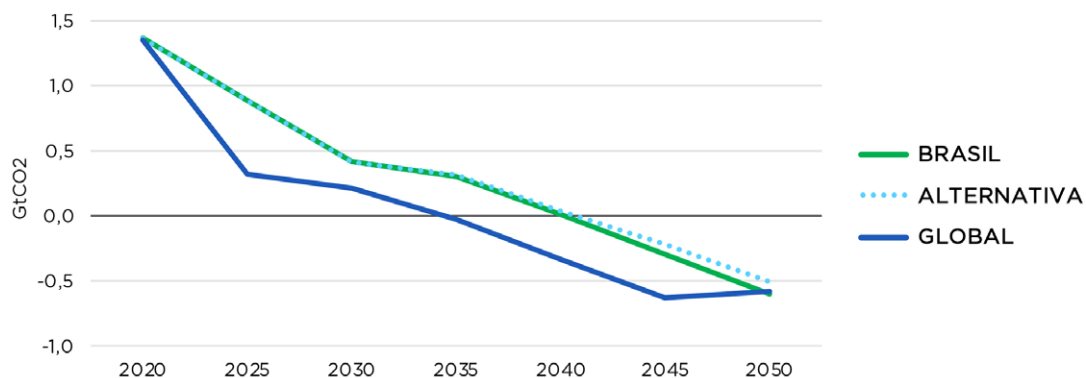
EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE), 2020-2050



O conceito de neutralidade de carbono assumido nos cenários de descarbonização contempla emissões líquidas nulas de todos os GEE. Para que a neutralidade em GEE seja alcançada no horizonte de 2050 é necessário haver emissões negativas de CO₂ em torno de 2040, ou seja, 10 anos antes do momento de alcance da neutralidade climática no país. O gráfico abaixo mostra que em 2050, nos três cenários de descarbonização (TB, TA e TG), as emissões de CO₂ são negativas em torno de 500 milhões de toneladas.

GRÁFICO 6

EMISSIONES DE CO2, 2020-2050



Os gráficos anteriores exemplificam o tamanho do desafio e que há muito a ser feito para alcançar a neutralidade climática no país. A trajetória de emissões expressa nos cenários de descarbonização indicam a insuficiência das políticas atuais (BAU, *Business As Usual*), ainda que apontem um aumento da participação de fontes renováveis na matriz brasileira.

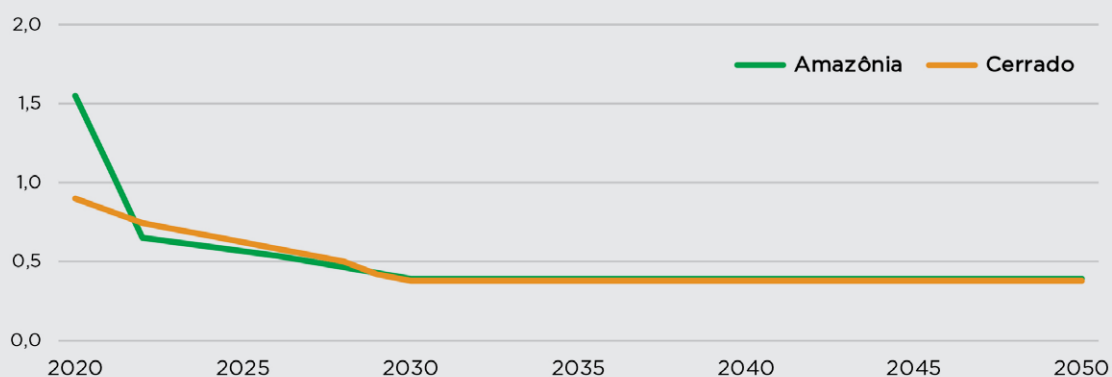
Outra conclusão relevante, face à necessidade de haver emissões negativas de CO₂ em 2040, é que na ausência de eliminação das emissões oriundas de desmatamento e mudança do uso da terra, o setor energético, precisará compensar parcialmente as emissões destas fontes e ao mesmo tempo lidar com as emissões remanescentes de GEE dos setores de difícil abatimento de emissões (*hard-to-abate*), como transporte de carga a longa distância e processos industriais carbono-intensivos, tornando a transição energética ainda mais onerosa e, portanto, um fator de perda de competitividade.

Na verdade, a conclusão é ainda mais relevante. Caso o país não consiga eliminar o desmatamento ilegal até 2028, encontra-se uma *impossibilidade de viabilidade técnica* e realista para que as emissões de GEE sejam zeradas em 2050, mesmo considerando aplicação de tecnologias pouco maduras no fim do horizonte (ver box temático).

Viabilidade irrealista da neutralidade com desmatamento

A fim de testar o impacto das emissões oriundas do desmatamento e mudanças no uso da terra no alcance do compromisso de neutralidade em carbono, elaborou-se uma análise de sensibilidade em que se replica o cenário TB, mas se mantém algum nível desmatamento no país, sem ações de restauração da cobertura florestal e/ou reflorestamento para compensar estas emissões. Neste exercício de sensibilidade, considera-se que as taxas de desmatamento se reduzem até 2028, mantendo-se estabilizadas no menor patamar histórico já alcançado no país, de 400 mil ha/ano na Amazônia e Cerrado, até o final do horizonte. A incapacidade desta análise de sensibilidade encontrar resultados viáveis para neutralidade de carbono significa que a continuidade do desmatamento por todo o período de análise contribui com emissões tão elevadas de CO₂ - em torno de 220 milhões tCO₂ anualmente - ou 11,5 bilhões tCO₂ no período de 2020-2050 - que torna impossível encontrar soluções realistas para o setor energético que façam com que aquelas emissões sejam compensadas. Isto ocorre mesmo diante de um conjunto bastante ambicioso de tecnologias disruptivas, tais como diferentes alternativas de produção de hidrogênio, diferentes opções de geração de energia elétrica e combustíveis a partir de fontes renováveis, eletromobilidade (incluindo pilhas a combustível), e inúmeras possibilidades de captura de CO₂, incluindo a opção de captura direta de ar (*direct air capture* - DAC). Caso não seja evitado, alcançar a neutralidade implicará um custo de compensação no mercado de carbono que pode chegar a US\$ 3,4 trilhões a fim de atingir os compromissos assumidos na NDC do Brasil.

GRÁFICO 7 DESMATAMENTO ILEGAL (MIL HA/ANO)



Dessa forma, a inviabilidade desta análise de sensibilidade reflete que, mesmo implementando todas as tecnologias possíveis até 2050, não seria possível compensar de forma realista as altas emissões provenientes do desmatamento, num horizonte de tempo de menos de três décadas.

Neste contexto de manutenção do desmatamento, para que o país consiga cumprir sua ambição apresentada durante a COP de Glasgow de neutralidade de carbono em 2050, as emissões positivas teriam que ser compensadas por meio da aquisição de créditos de carbono, gerando um custo adicional de US\$ 3,4 bilhões (considerando um preço de carbono de US\$ 350/tCO₂ eq).

Pode-se calcular o custo desta medida comparando a diferença de emissões entre o cenário TB e a análise de sensibilidade apresentada no Box acima (TB com desmatamento). Para se atingir a neutralidade climática em 2050, há uma diferença de 761 milhões tCO₂ entre os dois cenários neste ano. Se esta quantidade de emissão fosse compensada através de aquisição de créditos de carbono, o custo para o Brasil variaria entre 53 e 266 bilhões de dólares em 2050, considerando-se uma faixa para o preço do crédito de carbono entre 70 e 350 dólares por tonelada⁶. No entanto, se for considerada uma redução gradual de emissões por parte do Brasil, adquirindo créditos de carbono ao longo do período, haveria a necessidade de compensar 9.764 milhões tCO₂, o que representaria um total entre 683 bilhões e 3,4 trilhões de dólares.

4.3. Agropecuária, Florestas e outros usos do solo

O setor de “Agropecuária, Florestas e Outros Usos do Solo” (na sigla em inglês AFOLU) engloba tanto a mudança de coberturas de vegetação (mudança de uso do solo), quanto a parte de implementação de diferentes tipos de meios de produção agropecuária (uso do solo). Esse setor possui diferentes tipos de mecanismos de produção com ou sem medidas de mitigação climática, que se diferenciam entre cada região brasileira, de acordo com suas condições edafoclimáticas e níveis de mão-de-obra distintos.

Conforme visto na seção anterior, o segmento AFOLU responde pela maior parte das emissões brasileiras (73% do total), sendo central para a viabilidade do alcance da neutralidade no país. Adicionalmente, o segmento apresenta um conjunto de opções atrativas de mitigação de baixo custo. Ou seja, quanto maior a redução de emissões no segmento AFOLU menor é a pressão no setor energético para introdução antecipada e onerosa de soluções redutoras de suas emissões, favorecendo uma transição energética de menor custo para o país.

Além disto, o segmento incluem opções de remoção natural de carbono (soluções baseadas na natureza – NBS⁷) que além remover carbono geram um conjunto de co-benefícios, tais como: resiliência das comunidades aos impactos das mudanças do clima; segurança hídrica e promoção da biodiversidade, enquanto elemento fundamental para o equilíbrio ecológico; controle biológico de pragas e doenças; bem como para a manutenção dos serviços ecossistêmicos que fornecem os benefícios da natureza para as pessoas, vitais para o bem-estar humano e para as atividades econômicas.

De fato, as NBS têm, globalmente, o potencial de entregar até 2030 pelo menos um terço da redução de CO₂ com custo-benefício necessário para que as emissões estejam alinhadas com as metas do Acordo de Paris (meta de 2°C)⁸. Os cenários do IPCC, que apresentam muitos caminhos para atingir as emissões líquidas zero, demonstram que a inclusão do NBS permite uma transição mais rápida e menos onerosa para a sociedade, seja por meio das reduções das emissões provenientes de mudanças no

6. Os valores de preço de carbono considerados estão em linha com o espectro de incerteza considerado na literatura. Veja Bertram, *et al.*, Energy system developments and investments in the decisive decade for the Paris Agreement goals. Environ. Res. Lett. 16 (2021).

7. As soluções climáticas naturais ou soluções baseadas na natureza (NBS no acrônimo em inglês) abrangem a conservação, restauração e uso sustentável de florestas, pastagens, manguezais, solos agrícolas, pântanos e outros ecossistemas que aumentem o armazenamento de carbono e/ou evitem as emissões de GEE (GEE), voltados para a mitigação das mudanças climáticas e aumento da resiliência climática.

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

uso da terra (evitando a degradação dos ecossistemas e realizando a gestão da agricultura), como aumentando os sumidouros naturais por meio de restauração e reflorestamento, apesar dos riscos relativos à permanência do carbono estocado.

Um dado positivo é que o Brasil detém grande potencial de NBS em seu território, respondendo por aproximadamente 20% desse potencial global com uma participação privilegiada, tanto em termos de volume, como de custo-efetividade⁹.

O resultado dos cenários de descarbonização corrobora esse potencial. Em todos os cenários ocorre o aumento da área de floresta a partir de uma combinação da interrupção do desmatamento com maiores níveis de reflorestamento. No cenário TA, para atingir as metas propostas, serão necessários 40 milhões de hectares de refloresta-

mento e/ou restauração ecológica. Destaca-se que na COP 26, em Glasgow, o Brasil se comprometeu a restaurar e reflorestar 18 milhões de hectares de florestas até 2030.

É interessante pontuar que além de contribuir para redução de emissões, o reflorestamento pode ser um importante vetor de criação de empregos.

É interessante pontuar que além de contribuir para redução de emissões, o reflorestamento e a restauração ecológica podem ser importantes vetores de criação de em-

pregos. Estudo recente aponta que podem ser gerados de 1 milhão a 2,5 milhões de postos de trabalho diretos na cadeia da restauração de ecossistemas se o Brasil restaurar 12 milhões de hectares até 2030, considerando que a restauração ativa de 100 hectares tem o potencial de gerar 42 empregos¹⁰.

Da mesma forma, é muito relevante o papel redutor de emissões oriundo da recuperação das pastagens degradadas e conservação de florestas. Os exercícios de quantificação dos cenários apontam que, nos cenários TB, TA e TG, a recuperação de pastagens chegariam a 29, 27 e 51 milhões de hectares, respectivamente. Esse processo de recuperação ocorre devido à possibilidade de estocagem de carbono abaixo do solo em pastagens recuperadas (ou também chamadas de pastagens de boa qualidade) com baixo custo de investimento e manutenção desse tipo de pastagens. Ademais, a pastagem recuperada propicia condições adequadas para alimentação dos animais, que passam a consumir um material de melhor qualidade nutricional e, conseqüentemente, a ter uma “taxa de engorda” maior, gerando maiores ganhos para o produtor rural em um tempo menor. Essa diminuição de áreas de solo degradadas é importante para reduzir as pressões sobre áreas de vegetação natural advindas da necessidade de expansão de terras agricultáveis para a produção de biocombustíveis nos cenários de descarbonização.

Além disso, nos cenários TB, TA e TG é possível observar um crescimento de aproximadamente 3,3, 3,5 e 5,9 milhões de hectares de florestas plantadas (eucalipto e pinus) no Brasil em 2050¹¹, respectivamente. Essa expansão se deve principalmente à demanda por biomassa para a produção de biocombustíveis celulósicos a partir da rota BTL (*biomass-to-liquids*), para a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis associados a CCS, como é o caso do querosene biocombustível e o diesel biocombustível.

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

10. Brancalion, Pedro HS, et al. "Ecosystem restoration job creation potential in Brazil." *People and Nature* (2022).

11. De acordo com o estudo POTENCIAL DE PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL - 2030 WWF (2021), o aumento de produtividade da pecuária brasileira pode liberar 36 milhões de hectares para outros usos sem a necessidade de desmatamento de áreas nativas.

Dessa forma, as florestas plantadas são uma excelente fonte de biomassa devido ao seu baixo custo de produção e a grandes taxas de captura de carbono durante o processo de desenvolvimento vegetativo até a colheita. Assim, florestas plantadas de eucalipto ou pinus capturam quantidades significativas de CO₂ atmosférico durante o processo de desenvolvimento, sendo parte armazenada abaixo do solo e parte no material celular. Posteriormente, durante o processo de fabricação do biocombustível, o CO₂ de processo é capturado e armazenado em reservatórios geológicos, fazendo assim o denominado BECCS (ver seção de Biocombustíveis). O modelo aponta esse tipo de processo de composição de bioinsumos para a produção de bioenergéticos associados ao CCS, visto que ele é o único meio que permite o modelo obter emissões negativas de carbono devido justamente à etapa agrícola. Enquanto isso, a associação de CCS a fontes fósseis permite no máximo emissões ligeiramente positivas, devido aos limiares técnicos da eficiência de captura do Dióxido de Carbono (CO₂) nos processos industriais.

Outro ponto de destaque é o aumento da participação de sistemas integrados lavoura-pecuária (ILP) e agroflorestais, em 2050, que alcança até 25 milhões de hectares no cenário TA. Esse tipo de sistema é importante visto que ele permite a implementação de diferentes cultivos e criações em um mesmo território, permitindo a mitigação climática devido à estocagem de carbono abaixo e acima do solo e à integração dessas florestas plantadas à cadeia de produção de biocombustíveis avançados.

As florestas plantadas são uma excelente fonte de biomassa devido ao seu baixo custo de produção e a grandes taxas de captura de carbono durante o processo de desenvolvimento vegetativo até a colheita.

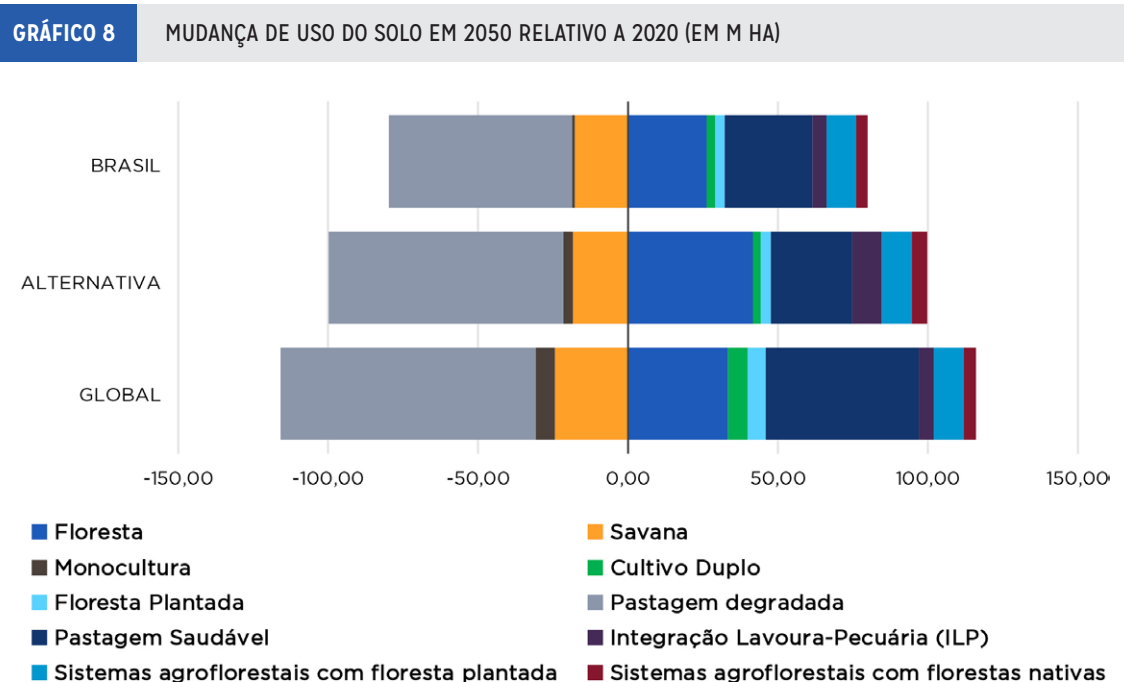
Nesta seção, evidenciou-se, com base em uma estratégia ótima de minimização de custo, que as mudanças no uso da terra buscando promover soluções de mitigação baseadas na natureza são fundamentais para alcançar a trajetória de neutralidade de carbono no Brasil.

Adicionalmente, as soluções de descarbonização identificadas apontam para o forte aumento em cultivos agroflorestais para produção de bioenergia, o que deverá ocorrer sem resultar em pressões sobre a biodiversidade, a produção de alimentos e a segurança hídrica. De fato, a modelagem leva em consideração estes objetivos. A demanda de alimentos, por exemplo, é um dado exógeno ao modelo e o seu atendimento é a condição básica de todos os cenários. Da mesma forma, a disponibilidade hídrica também é avaliada em todos os cenários. São consideradas as demandas de água para as tecnologias que compõem o sistema energético¹² (por exemplo, hidrelétricas, refinarias, produção de biocombustíveis, usinas térmicas, produção de hidrogênio, entre outras), a demanda de água para os processos agropecuários, restrições hídricas para alocação das culturas nas mesorregiões, assim como outros usos da água. Isso significa que as demandas de alimentos, de serviços energéticos e de água são sempre atendidas; ou seja, são garantidas as seguranças alimentar, energética e hídrica. Conforme pode ser visto no gráfico 8, que sintetiza as mudanças cumulativas no uso do solo no país para os diferentes cenários, as trajetórias de neutralidade brasileira conciliam os objetivos agropecuários, energéticos e ambien-

12. A tese de doutorado de Vásquez-Arroyo (2018) detalha a elaboração do módulo hídrico no modelo BLUES. Os trabalhos de Angelkorte (2019) e Köberle (2018) detalham o módulo de uso do solo.

tais. Neste sentido, a principal fonte de terra para promoção das NBS é a conversão de pastagens degradadas em florestas (nativas e plantadas), sistemas agroflorestais e agropecuária de baixo carbono, conforme apresentado em estudos anteriores. Deste modo, obtém-se o aumento da oferta de alimentos, a remoção de carbono e o insumo para produção de bioenergia, sem impacto significativo no uso da água e sem necessidade de desmatamento. Ao contrário, observa-se o aumento das florestas e, assim, um ganho positivo em biodiversidade.

O gráfico 8 também evidencia a centralidade dos segmentos de Agropecuária e Florestas para neutralidade de carbono, apresentando-se como necessária uma mudança disruptiva (e desafiadora) no uso da terra no Brasil, quando comparado com as tendências atuais, para que o país possa alcançar uma trajetória de descarbonização custo-eficiente.



4.4. Investimento e Emprego

Os cenários analisados mostraram diferentes caminhos para a redução de GEE e, portanto, níveis distintos de investimento em cada setor. As maiores diferenças entre os cenários ocorrem nos seguintes setores:

- Setor elétrico, devido à alta expansão da energia eólica para atender a eletromobilidade e a maior geração de hidrogênio de baixo carbono (majoritariamente, verde) no cenário TA;
- Setor de combustíveis, com alta produção de biocombustíveis celulósicos. Eles se tornam ainda mais relevantes quando não se alcança a viabilidade econômica para utilização de CCS, conforme o cenário TA;
- CCS: necessidade de gastos com infraestrutura de transporte e injeção de CO₂ para os cenários TB e TG.

Como o processo de transição energética é também um processo cultural que envolve a transformação de hábitos, costumes e capacidades, o nível de investimento realizado em cada cenário pode se traduzir na quantidade de emprego gerado em cada setor.

Assim, a fim de avaliar o esforço de adaptação dos setores às necessidades impostas em cada cenário de transição energética, e sinalizar oportunidades e desafios do sistema educacional e do mercado de trabalho para moldar uma força de trabalho capaz de responder às novas demandas, realizou-se o mapeamento dos empregos gerados por setor e por cenário. Para o cálculo, realizado a partir dos investimentos cada cenário¹³, os números foram convertidos em real utilizando uma taxa constante de câmbio de 5,00 BRL/USD, conforme tabela abaixo:

TABELA 3. INVESTIMENTOS ANUALIZADO (2020-2050)

Milhão R\$ @2020	BAU	TB	TA	TG
Uso do solo	4.085	32.928	42.458	37.475
CCS	-	2.136	-	4.466
Edificações	35.861	35.905	37.376	35.770
Resíduos	4.283	5.034	6.442	4.352
Indústria	18.191	18.529	18.277	22.499
Combustíveis (Fóssil e Bio)	41.719	96.508	130.385	113.351
Setor Elétrico	38.953	42.062	73.905	53.823
TOTAL	143.093	233.102	308.844	271.737

Considerando esses valores e os chamados coeficientes de emprego (geração de postos de trabalho por unidade de PIB), a tabela 4 abaixo, reporta o intervalo de geração de postos de trabalho diretos e indiretos potenciais em cada cenário. Vale destacar que os valores abaixo representam o número médio de postos de trabalhos sustentados a cada ano pelos investimentos associados à transição energética e, portanto, não devem ser somados. Os investimentos e postos de trabalho gerados são maiores nos cenários que exigem esforços mais significativos de mudança de infraestrutura e de composição da oferta e demanda de energia. Uma maior transformação requer, de fato, mais investimento e empregos associados.

TABELA 4. POSTOS DE TRABALHO (MÉDIA ANUAL EM MILHÕES)

BAU	TB	TA	TG
de 2,9 a 3,6	de 4,7 até 5,8	de 6,2 até 7,8	de 5,4 até 6,8

13. Vale destacar que o exercício proposto foca exclusivamente na geração de empregos criados a partir do volume de investimento, não sendo, portanto, o total de emprego da economia brasileira em cada cenário. Também não foi avaliado se o maior investimento traz implicações alocativas para outros agregados econômicos, o que poderia impactar investimento e consumo em outros setores (efeito deslocamento).

Oferta de energia

5

Esta sessão explora como a produção dos energéticos se altera para suprir a demanda com respeito às metas climáticas de cada cenário. O setor elétrico brasileiro, como parte de uma situação bastante privilegiada em termos de participação das fontes não emissoras, apresenta uma expansão que reforça a tendência atual de penetração cada vez maior das fontes eólica e solar.

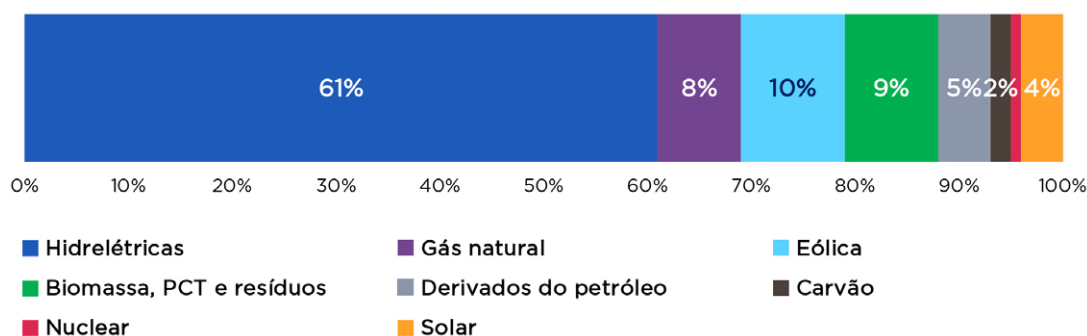
Já o setor de transportes, além dos combustíveis tradicionais, teve a biomassa convertida em derivados via gaseificação e síntese de Fisher-Tropsch como grande provedora de combustíveis de baixa emissão.

O forte aproveitamento da biomassa permitiu alcançar as metas climáticas dos cenários com uma menor dependência do desenvolvimento das fontes hidrogênio e biometano na substituição das fontes emissoras em setores de difícil eletrificação.

No que tange a produção de combustíveis fósseis, destaca-se a importância das tecnologias de CCUS para manutenção do aproveitamento desta fonte.

5.1. Geração Elétrica

O setor elétrico no Brasil se desenvolveu com base no aproveitamento dos abundantes recursos hídricos disponíveis, sendo caracterizado em sua essência por apresentar grandes usinas hidrelétricas, com reservatórios de regularização plurianual, e longas linhas de transmissão interligando os grandes subsistemas nacionais, constituindo um sistema interligado de geração e transmissão de dimensão continental, coordenado centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Essa forte presença da hidroeletricidade, que se traduz em uma matriz elétrica majoritariamente renovável, fez com que, no Brasil, o tema da redução de emissões fosse pouco expressivo no setor. O peso desta fonte no mix de geração elétrica vem crescendo ao longo dos anos, entretanto ainda representa 61% da capacidade de geração em 2020.



Fonte: Boletim mensal de monitoramento do Setor Elétrico do MME, dezembro de 2021

Em 2000, o gás natural surgiu como uma fonte complementar e ganhou seu espaço em um contexto de restrição da expansão hidroelétrica e redução da capacidade de regularização dos reservatórios¹⁴. Desde aproximadamente 2011, uma expansão cada vez maior das fontes eólica e solar reforçaram o seu papel de fonte complementar, garantidora da segurança da operação do sistema.

Nesse contexto, um debate se estabeleceu em torno de qual deve ser o papel do gás natural, se a fonte está corretamente valorada e como lidar com a incompatibilidade da necessidade de flexibilidade por parte do setor elétrico *versus* a neces-

sidade de garantias para viabilizar grandes investimentos por parte do setor de gás. Recentemente, a lei da Capitalização da Eletrobras estabeleceu a contratação de 8 gigawatts de termelétricas movidas a gás natural até 2032, que exigirão a construção de gasodutos e linhas de transmissão, reacendendo o debate sobre atratividade econômica de acoplamento de mercados nestas condições.

As usinas eólicas já superaram o gás natural em capacidade instalada: as eólicas representavam 10%

da capacidade em 2020, enquanto o gás natural, 8%. A fonte solar, por sua vez, respondeu por 4% da capacidade, tendo apresentado um crescimento muito significativo nos anos recentes, principalmente na modalidade distribuída. Em 2020, a geração distribuída superou a centralizada: 4,4 GW em comparação a 3,3 GW.

No começo de 2022, foi sancionado o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei 14.300/2022). Este mantém a isenção do pagamento da Tarifa de Uso do Sistema de

Um debate frequente ao longo desses anos se estabeleceu em torno de qual deve ser o papel do gás natural no setor, se a fonte está sendo corretamente valorada e sobre como lidar com a incompatibilidade da necessidade de flexibilidade por parte do setor elétrico *versus* a necessidade de garantias para viabilizar grandes investimentos por parte do setor de gás.

14. A inserção de fontes térmicas menos poluentes contribuiu significativamente para consolidar o baixo perfil emissor da matriz elétrica brasileira. De fato, a evolução da matriz de geração com as expansões mais acentuadas da biomassa, do gás natural e da nuclear representou aproximadamente 267 milhões de toneladas de CO₂-eq evitadas ou 23% do que seria emitido caso a estrutura de geração termelétrica fosse a mesma desde a 2000. Ver <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-660/EPEFactSheetEmissoesSetorEletrico.pdf>.

Distribuição (TUSD), até 2045, para os sistemas com parecer de acesso aprovado até 6 de janeiro de 2023, o que deve manter aquecida a corrida por novas instalações, permitindo que o país alcance o potencial máximo neste vetor energético. Apenas nos oito primeiros meses de 2022, foram adicionados 3,7 GW de GD Solar.

Em todos os cenários projetados, observamos a expansão da capacidade de geração sendo respondida predominantemente pelas fontes eólica e solar, com consequente redução da participação relativa da hidroeletricidade. No cenário TB a participação das hidrelétricas se reduz para 55%, no TG para 54% e no TA para 30%. Isto reflete por um lado as limitações à construção de novos projetos hidroelétricos com barragem em virtude do impacto ambiental e social causado e, por outro lado, a própria competitividade de outras fontes renováveis.

Em todos os cenários de transição energética projetados, observamos a expansão da capacidade de geração sendo respondida predominantemente pelas fontes eólica e solar, com consequente redução da participação relativa da hidroeletricidade.

Nesse sentido, a participação de fontes renováveis na geração elétrica brasileira continua a se ampliar, ultrapassando a marco de 90% do mix elétrico. Partindo de um percentual já elevado de 86% da capacidade em 2020, alcançam 91% em 2050, no cenário TB, e 93% no TA.

O grande aumento de participação é observado na energia eólica, que amplia de 9%, em 2020, para 17%, 47% e 14%, em 2050, nos cenários TB, TA e TG, respectivamente. A energia solar também ganha relevância por meio de usinas fotovoltaicas e da geração distribuída. Para essa última, a expansão de capacidade se expande até atingir a capacidade potencial de 43 GW no final do período em todos os cenários.

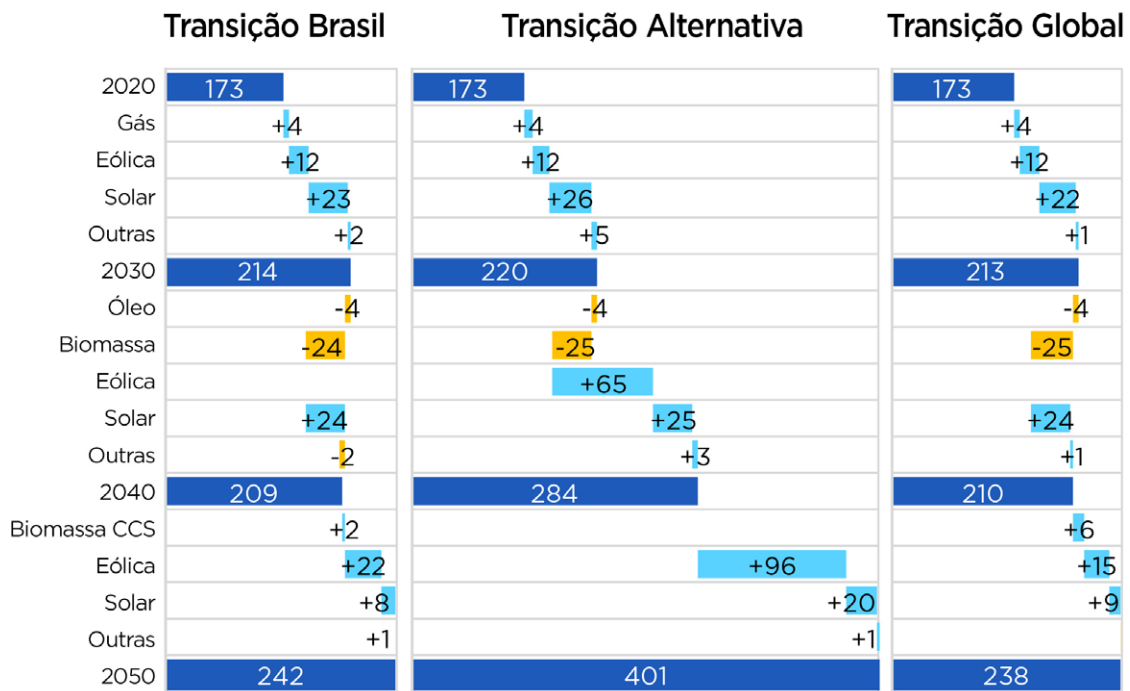
A diferença mais significativa dos cenários TB e o TG com relação ao cenário TA é a penetração da fonte biomassa associada à captura de carbono, conforme ilustrado no gráfico abaixo, que mostra a evolução da capacidade instalada por fonte, e por cenário. No cenário TG, a penetração é ainda mais destacada do que no caso TB, em virtude da maior necessidade de alcançar emissões negativas.

Vale destacar que apesar de existir opções de CCS para fontes fósseis (gás natural e carvão), elas não são selecionadas em nenhum cenário pelo exercício de otimização desenvolvido, em decorrência dos desafios técnicos e econômicos. As tecnologias de captura encontram sua mais apropriada utilização, segundo a indicação otimizada do modelo, quando o CCS está associado à produção de bioeletricidade. Esta escolha decorre da condição de alto grau de concentração do CO₂ nos gases exaustos da geração de bionergia, o que torna menos desafiador capturá-lo, como também pela resultante de emissões negativas (e não apenas neutras) no ciclo de vida¹⁵.

15. Cabe ressaltar que, na realidade, pode haver casos concretos nos quais os investimentos em CCS sejam condições para viabilizar projetos de O&G à medida que se afaste de 2030.

GRÁFICO 10

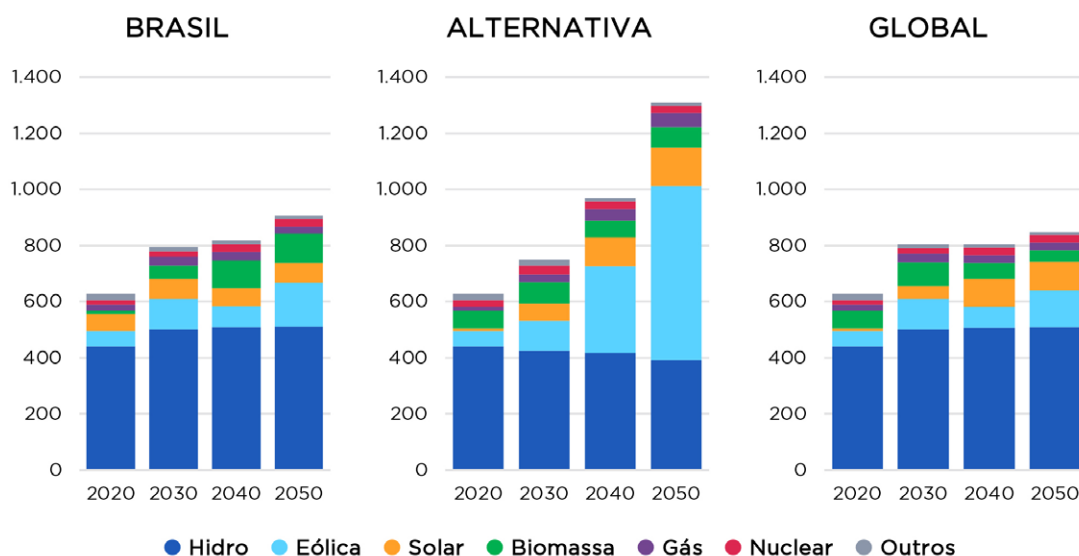
VARIAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL POR FONTE E CENÁRIO (GW)



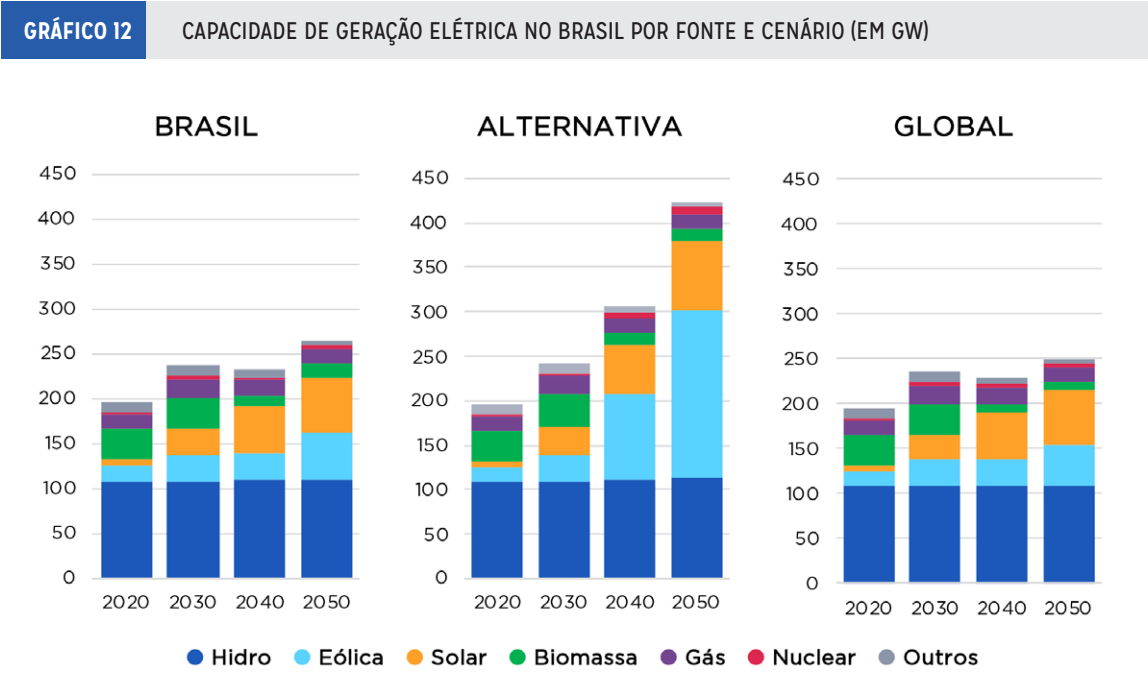
O cenário TA se diferencia dos demais primeiramente pelo montante demandado de energia elétrica. Enquanto os outros cenários apresentam uma demanda por eletricidade crescendo 2% em média ao ano, entre 2020 e 2040, este apresenta uma taxa de 4% ao ano. Além disso, o cenário TA contém algumas restrições para representar trajetórias que não resultam diretamente da escolha ótima (no modelo), mas que são possíveis de ocorrer por intervenções de política pública ou incertezas climáticas ou tecnológicas. O cenário TA indica 8 GW de usinas nucleares até 2050, enquanto os demais contam com 3,5 GW. Nele não se aplica o uso de CCS e, apesar do cenário TA contar com uma capacidade hidrelétrica maior do que a dos demais cenários (2,4 GW a mais em 2050), a geração média, conforme apontado no gráfico abaixo, é menor.

GRÁFICO 11

GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR FONTE E CENÁRIO (TWH/ANO)



De forma geral, o desafio de maior demanda com menos geração hidroelétrica no cenário TA é suprido majoritariamente por uma expansão das fontes eólica e solar, com destaque para a primeira (delta de geração em 2050: 448 TWh por eólicas e 33 TWh por fonte solar fotovoltaica). A entrada bastante superior de eólicas, sem o aumento das fontes despacháveis e menor capacidade de uso dos reservatórios hidrelétricos, é viabilizada pela adoção de sistemas de armazenamento, com a entrada de 2 GW de capacidade instalada de baterias eletroquímicas.



O crescimento da geração elétrica é acompanhado por uma consequente necessidade de expansão das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), para comportar o aumento do fluxo de eletricidade. Essa expansão ocorre tanto dentro dos subsistemas, quanto no intercâmbio de energia elétrica entre eles. Além disso, é considerado um aumento da eficiência nas novas instalações de transmissão de distribuição de eletricidade, reduzindo as perdas no transporte. Desta forma, a expansão das fontes de geração no cenário TA é acompanhada por uma expansão em torno de 60% na transmissão de energia. Para os demais cenários essa expansão é de aproximadamente 30%, conforme mostrado na tabela abaixo.

TABELA 5. AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

	BRASIL	ALTERNATIVA	GLOBAL
2020	141	141	141
2050	185	221	181
Variação	+31%	+57%	+28%

Tendo um elevado potencial de usinas eólicas e solares, pode aparentar que não existam desafios para que o setor elétrico contribua para as trajetórias de transição energética do Brasil. Entretanto, estes estão intrinsecamente ligados à pauta de modernização do setor. A modernização é necessária para suportar as mudanças na forma de operar o sistema e de transacionar a energia, que permitirão as mudan-

O crescimento da geração elétrica é acompanhado por uma consequente necessidade de expansão das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), para comportar o aumento do fluxo de eletricidade.

ças necessárias na composição de fontes e a introdução de novas tecnologias e capacidades sem onerar - ou até mesmo reduzindo - o custo para o consumidor final.

Desde 2017, o tema da modernização do setor elétrico se faz presente, com a abertura da Consulta Pública nº 33 (CP 33). Em 2019, foi criado um Comitê de Moderniza-

ção do setor, pelo Ministério de Minas e Energia, com 16 frentes de trabalho e entregas parciais que vão até 2023. No ano de 2021 houve a realização do primeiro procedimento competitivo simplificado para a contratação de energia de reserva e, com o primeiro leilão de reserva de capacidade, já antecipando as discussões sobre a separação de lastro e energia. Destaca-se ainda a implementação da operação em base horária e que a Medida Provisória 998 virou a lei n. 14.120 (1º de março de 2021). Ainda nesse ano, o PLS 212, que incorporou as recomendações do Grupo de Trabalho e as contribuições recebidas na CP 33, seguiu para a Câmara, figurando como o PL 414/2021, que trata dos temas de abertura do mercado; aperfeiçoamento do mercado de energia; aprimoramento das tarifas; e redução de encargos tarifários.

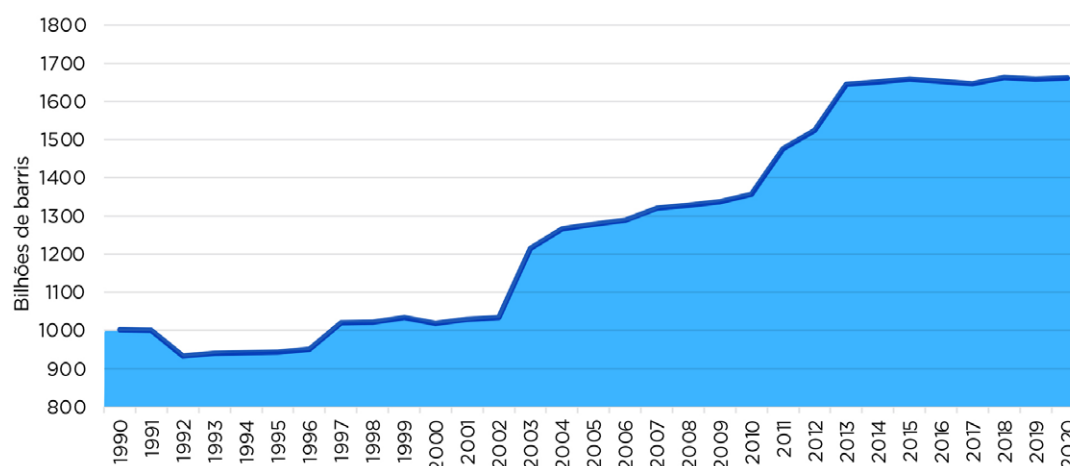
5.2. Petróleo, Gás Natural e Derivados

No final do século XX e início do XXI, uma percepção recorrente no mercado global de energia e nos estudos acadêmicos era a de que o mundo caminhava para um “*peak oil*”, isto é, um momento em que a produção de petróleo atingiria seu ápice e, a partir daí, o esgotamento das reservas levaria ao declínio da oferta de óleo e gás.

Porém, passados pouco mais de 20 anos, as perspectivas e desafios do setor petrolífero são bastante distintos. Em primeiro lugar, novas descobertas e tecnologias de extração (como o fraturamento hidráulico) aumentaram significativamente as reservas provadas. As reservas mundiais, que permaneceram relativamente estáveis por toda a década de 1990, cresceram de forma acelerada entre 2002 e 2013. Em 2020, elas eram 63% maiores do que no início do século.

GRÁFICO 13

RESERVAS PROVADAS MUNDIAIS



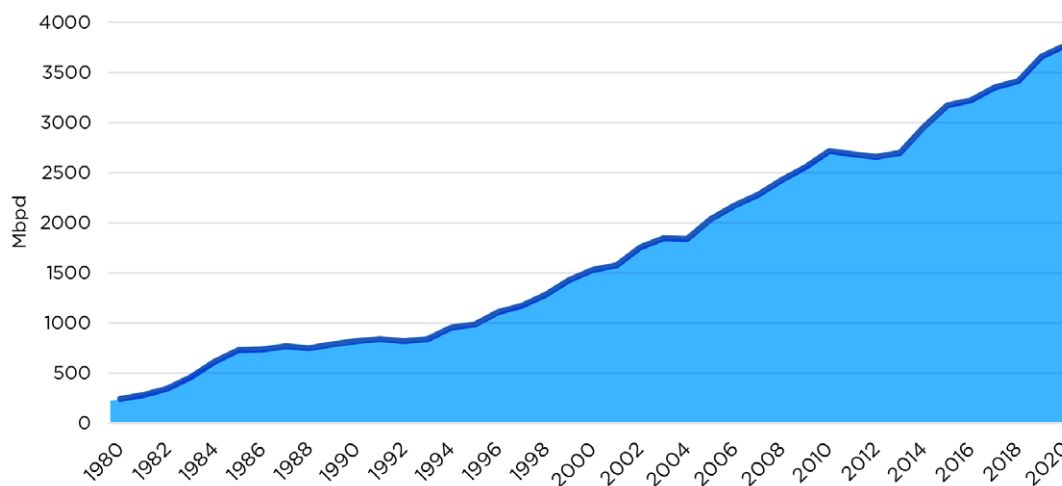
Fonte: US Energy Information Administration (EIA)

Paralelamente, as últimas décadas também evidenciaram o imperativo da redução da emissão de GEE e, com isso, a necessidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis. A resultante desses dois fatores é que, ao invés de se deparar com o quadro de escassez de petróleo, a indústria do óleo e gás vislumbra a chegada de um “*peak demand*”, ou seja, o ponto em que é a demanda de petróleo - e não a oferta - que atinge seu pico e posterior decaimento.

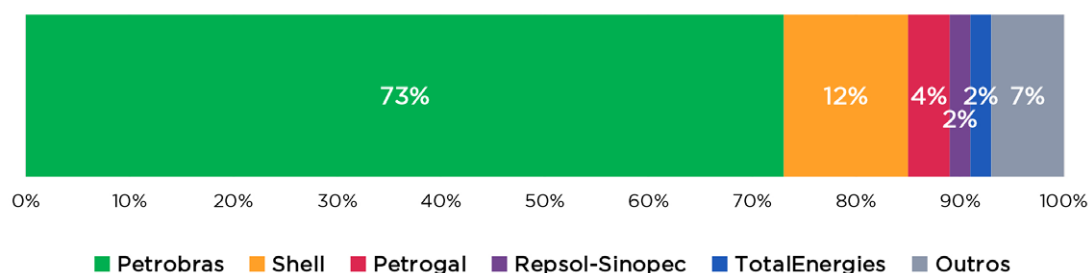
O Brasil foi um dos países que contribuíram para o crescimento das reservas e da produção mundial. Ademais, a produção nacional mais que dobrou desde a virada do século. Qualitativamente, houve diversificação dos agentes, com destaque para o crescimento da participação de grandes empresas petrolíferas internacionais, que já representam mais de um quarto do total. Entre outros efeitos, o aumento da presença de multinacionais atrela ainda mais fortemente o setor de petróleo brasileiro às percepções e rumos da indústria internacional e, em particular, às suas estratégias para a transição energética.

GRÁFICO 14

PRODUÇÃO NACIONAL DE PETRÓLEO



Fonte: ANP



Fonte: ANP

A situação se apresenta como um dilema crucial para o país. De um lado, o setor de petróleo cresce e se internacionaliza. De outro, é o setor mais atingido nos cenários de transição energética em que o foco é a redução das emissões de carbono e/ou controle do aumento da temperatura global. O BID estimou que, se os objetivos do Acordo de Paris em nível internacional forem cumpridos, devido à queda na demanda, o Brasil poderá ver sua produção de petróleo reduzida quase pela metade até 2035¹⁶. Contudo, outros estudos apontam que o petróleo brasileiro terá um papel relevante para atender o mercado global no futuro (IEA, 2022; EIA, 2021; OPEC, 2022), em particular devido à tripla resiliência (técnica, econômica e ambiental) do petróleo nacional (Rystad Energy, 2022; Wood, 2018; COPPE-IBP, 2022).

Historicamente, a indústria de O&G tem alta dinâmica inovativa e uso intenso de ciência e tecnologia, adaptando-se a diferentes contextos de mercado e transformando desafios em oportunidades. Por exemplo, o advento da eletricidade no século XX, por exemplo, afetou seu principal produto, o querosene iluminante, mas a indústria de O&G incorporou novos processos e desenvolveu diversos combustíveis para o setor transportes (gasolina automotiva, diesel, *bunker*, gasolina e querosene de aviação) e industrial (óleo combustível, GLP e gás natural), bem como o mercado petroquímico (nafta, etano, GLP, gás natural) e residencial (GLP, gás natural, gasóleo de aquecimento). A nova transição energética traz enormes desafios para a indústria de hidrocarbonetos (O&G). A indústria de O&G precisará reduzir sua pegada de carbono e adaptar progressivamente seu portfólio de negócios. Todavia, esses desafios trazem grandes oportunidades para aqueles melhor adaptados ao contexto.

Frente a esta dinâmica, é crucial que petróleo que atenda a demanda global remanescente alcance uma dupla resiliência: econômica (baixo custo de produção) e ambiental (baixa intensidade de carbono no mercado internacional).

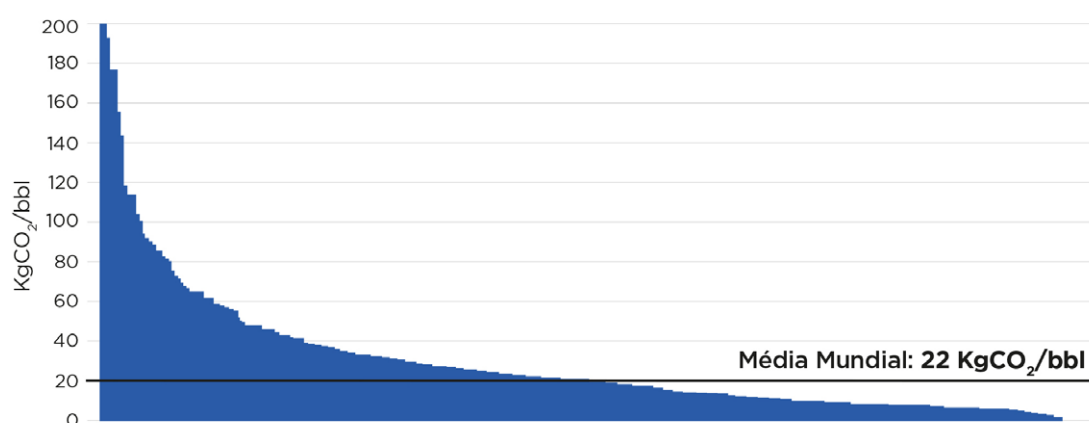
No Brasil, em particular, a riqueza gerada pela indústria de O&G tem contribuído para financiar a transição energética e as inovações necessárias para a neutralidade de carbono em 2050, inclusive para remoção de carbono com CCUS, maior eficiência energética (inclusive com eletrificação e digitalização de equipamentos, processos e unidades produtivas) e inserção de renováveis na cadeia de valor de O&G (eólica *onshore* e *offshore*, solar, ondas, biorrefino, etc.), hidrogênio de baixo carbono e compensação florestal (Machado, 2022). Por isso, tanto a redução de emissões de carbono, quanto a “remoção de carbono” são importantes para a

16. Sobre as implicações e os riscos da transição energética para as indústrias extrativas, ver os estudos “Implications of Climate Targets on Oil Production and Fiscal Revenues in Latin America and the Caribbean” e “Marco Sectorial de Industrias Extractivas”.

estratégia brasileira de mitigação. O petróleo brasileiro apresenta tripla resiliência (técnica, econômica e ambiental), sendo um dos que tem menor intensidade carbono no mercado internacional. A intensidade de carbono média do petróleo no mundo é de 22 quilos de CO₂ por barril de óleo equivalente produzido (KgCO₂/b), com alguns petróleos com intensidade de carbono entre 50 kg CO_{2eq}/b e 200 kg CO_{2eq}/b. Já a intensidade de carbono média do petróleo do Brasil é de cerca de 15 kg CO_{2eq}/b, sendo que óleos do pré-sal estão abaixo de 10 kg CO_{2eq}/b (Rystad Energy, 2022; Petrobras, 2022¹⁷).

É preciso ressaltar que o petróleo continua como vetor importante para atender a segurança energética dos países ao longo da transição energética. E mesmo no longo prazo, cenários que projetam a neutralidade em carbono global indicam a manutenção de uma demanda remanescente por petróleo, a fim de satisfazer as demandas dos setores de difícil de descarbonização e para fins não energético (utilizações que não ocorre a combustão de derivados de petróleo e, portanto, sem emissões diretas). Por exemplo, o mais recente World Energy Outlook (2022), da Agência Internacional de Energia, indica uma demanda por petróleo de 23 milhões de barris por dia em 2050. Neste sentido, o petróleo brasileiro contribui para a mitigação das emissões globais de GEE ao deslocar óleos de maior intensidade de carbono no mercado global para atendimento da demanda remanescente, devendo ser um dos últimos petróleos a sair do mercado. Adicionalmente, as características físico-químicas do petróleo do pré-sal (média densidade e baixo teor de enxofre) e o perfil do parque de refino mundial, que demanda e valoriza cargas de petróleo com características similares ao brasileiro, reforçam sua competitividade e menor intensidade de carbono (petróleos médios e com baixo teor de enxofre implicam em menores emissões de carbono no refino). Em outras palavras, ao deslocar O&G com maior intensidade de carbono no mercado global, o O&G brasileiro contribui para mitigar emissões de GEE, pois sua produção está entre as menos emissoras de GEE no mundo. Esse fato será ainda mais relevante ainda nos próximos anos devido à eficiência energética, inserção de renováveis e remoção de carbono (CCUS e compensação florestal)¹⁸.

GRÁFICO 16 INTENSIDADE DE CARBONO DO PETRÓLEO NO MUNDO (KgCO₂ POR BARRIL)



Fonte: Rystad (2022). Carbon Footprints of Crude Grades – Are they all alike?

17. Rystad Energy (2022). Carbon Footprints of Crude Grades–Are They All Alike? Free Global Emissions Series Report, May 2022. Petrobras (2022). Challenges and Opportunities for Petrobras' s Decarbonization. Apresentação realizada na OTC 2022.

18. Machado, Giovani (2022). "Planejamento e o futuro do setor energético brasileiro aderente às preocupações da COP 26", capítulo 12, pp: 92-98, in: CEBRI (2022). Energia em um mundo em transição: desafios, oportunidades e perspectivas.

Da mesma forma, a produção de petróleo do pré-sal brasileiro tem apresentado custos de extração extremamente competitivos. Em seu Plano Estratégico 2022-2026, a Petrobras sinalizou a perspectiva de operar com custos de extração de E&P médio (sem os custos de afretamento e participações governamentais) de US\$ 4,8/boe, sendo potencialmente tão baixos quanto US\$ 3,5/boe no caso do pré-sal, que representará 79% do total da companhia no final de 2026.

Os resultados apresentados nos cenários confirmam esta tripla dinâmica da indústria de O&G no Brasil. Quando se observa consumo nacional, ocorre redução (absoluta e proporcional) do petróleo como energia primária no Brasil nos três cenários. O consumo de petróleo na economia brasileira se reduz, traduzindo-se em uma redução da participação na matriz energética dos atuais 35% para entre 15% no cenário TB e 5% no cenário TA. Entretanto, quando se observa a produção de petróleo, o quadro se inverte, já que a indicação é de aumento da produção nacional de petróleo cru, voltado a atender a demanda externa global nos cenários, devido ao aumento das exportações. A exceção são os anos finais do Cenário TA.

GRÁFICO 17 CONSUMO BRASILEIRO DE PETRÓLEO

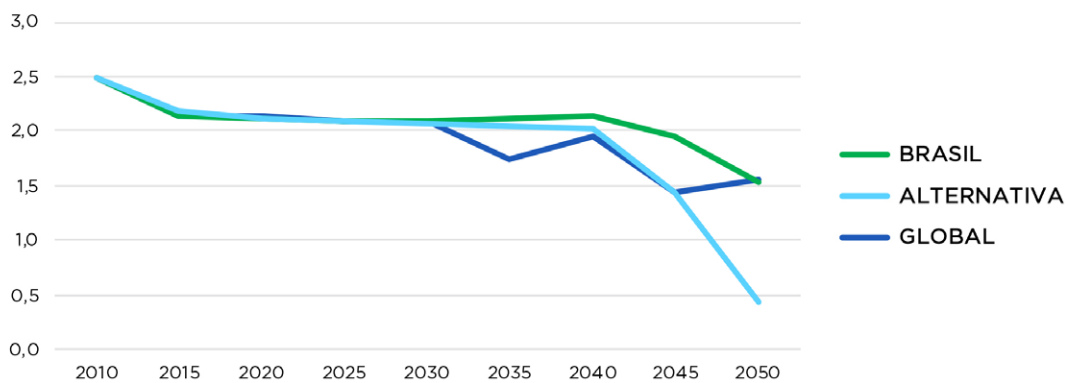
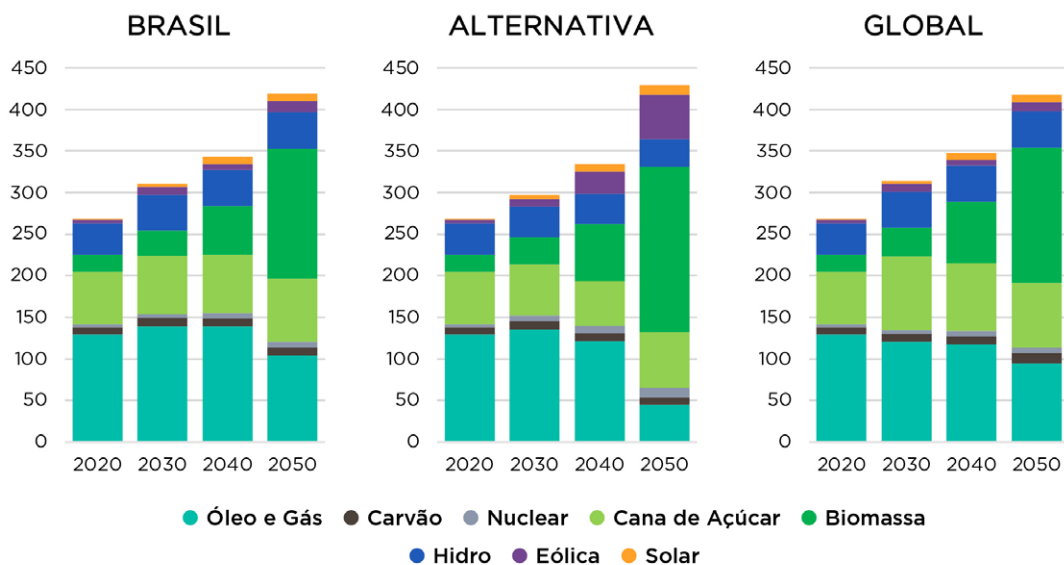
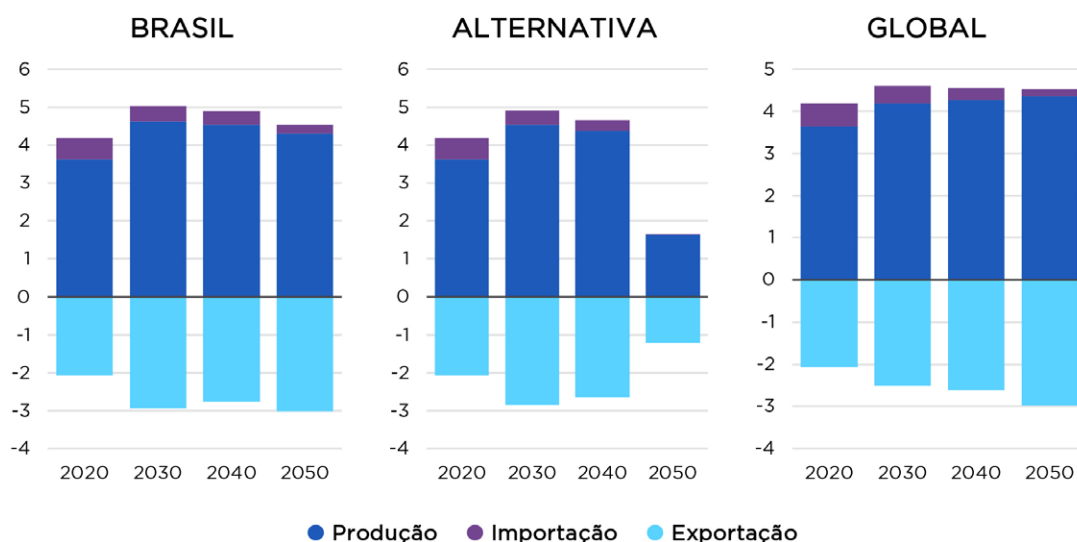


GRÁFICO 18 USO BRASILEIRO DE ENERGIA PRIMÁRIA





Esta manutenção da produção sustentada pelas exportações reflete a tripla resiliência do petróleo: baixa intensidade de carbono em sua produção e refino e baixo custo de produção, acima mencionada. Destaca-se a importância de manter este quadro de competitividade das reservas petrolíferas¹⁹.

De fato, neste contexto de transição, o setor de O&G tem papel socioeconômico relevante no país e deverá inovar e investir em transição energética e descarbonização, reduzindo ainda mais sua intensidade de carbono e mudando progressivamente seu portfólio de negócios.

Adicionalmente, a riqueza gerada nesse setor tem contribuído e contribuirá para financiar a transição energética e as inovações necessárias para a neutralidade de carbono em 2050, inclusive para remoção de carbono com CCUS, maior eficiência energética (eletrificação e digitalização de equipamentos, processos e unidades produtivas) e inserção de renováveis na cadeia de valor de O&G (eólica *onshore* e *offshore*, solar e ondas no E&P ou como projetos de novos negócios, biorrefino, etc.), hidrogênio de baixo carbono e compensação florestal.

Ao deslocar O&G com maior pegada de carbono no mercado internacional, o O&G brasileiro contribui para mitigar emissões de GEE.

Deve-se atentar que o aumento das exportações, em conjunto com a redução das importações, torna a produção nacional ainda mais dependente do mercado internacional de petróleo, em particular do sudeste asiático, conforme resultados da quantificação.

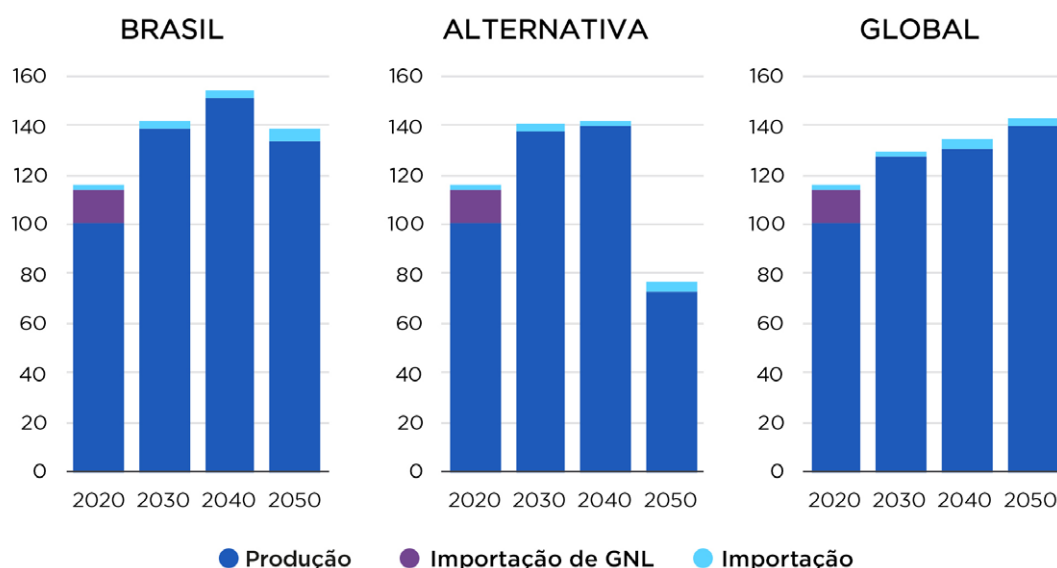
Em relação ao gás natural, à semelhança do óleo, espera-se crescimento da produção nos três cenários (mais uma vez, a exceção é a última década do horizonte para o cenário TA). No entanto, há diferenças marcantes. Primeiro, a importação torna-

19. A literatura científica também tem apontado que petróleo de melhor qualidade (menor intensidade de carbono) tende a se manter no mercado para atendimento dos setores de difícil descarbonização. Ver Draeger et al. (2022), *Stranded crude oil resources and just transition: Why do crude oil quality, climate ambitions and land-use emissions matter*.

-se marginal, concentrada na importação por dutos (ou seja, da Bolívia) enquanto a importação de GNL é praticamente nula. Em segundo lugar, o aumento da produção é absorvido pelo mercado interno, sem a necessidade/dependência do mercado externo. Em outras palavras, para todos os cenários, a produção nacional é capaz de suprir a crescente demanda interna (em especial na indústria) por gás natural.

GRÁFICO 20

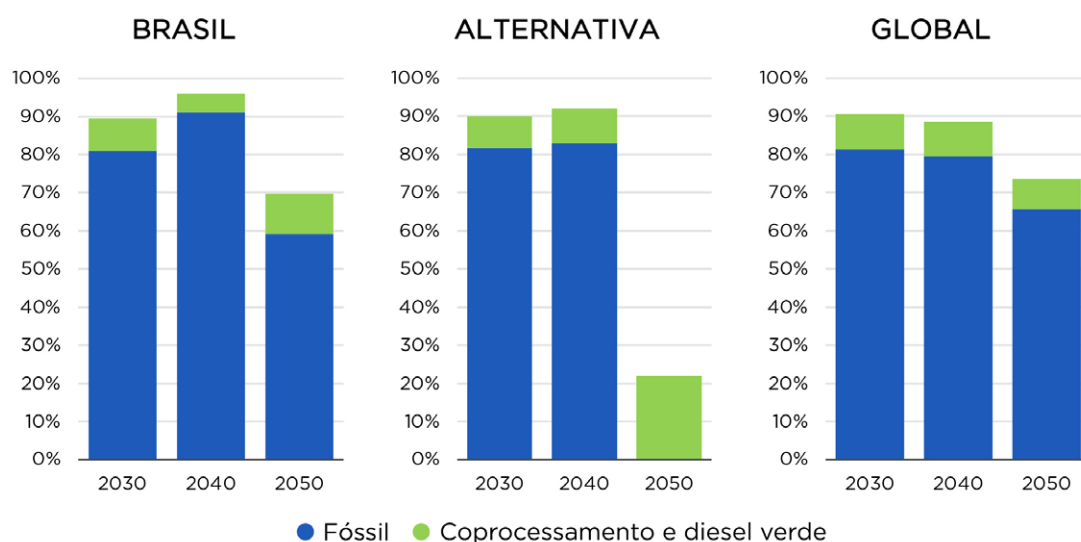
PRODUÇÃO E IMPORTAÇÃO DE GÁS NATURAL



Como reflexo da redução do consumo doméstico de gasolina, diesel e outros derivados de petróleo ocorrem relevantes mudanças na utilização do parque de refino, dado que haveria uma menor necessidade de processamento do óleo bruto. Como efeito, em 2050, ocorre uma queda no fator de utilização do refino (isto é, no percentual de utilização da refinaria em relação à sua capacidade de processamento

primário total) dos cenários de neutralidade em carbono. Alternativamente, as refinarias podem ser convertidas em biorrefinarias ou em complexos energéticos em uma lógica de requalificação de ativos alinhados à transição energética.

Como efeito, em 2050, ocorre uma queda no fator de utilização do refino dos cenários de neutralidade em carbono.



Dessa forma, o fator de utilização nas refinarias do petróleo se reduz de 84%, em 2020, para 70% no cenário TB, e 74% no cenário TG em 2050. No cenário TA observa-se uma queda drástica no fator de utilização função do comportamento doméstico da demanda por derivados de petróleo, resultando em um fator de utilização de 22% em 2050, todo ele operado em coprocessamento de correntes de petróleo e biomassa. De fato, em todos os cenários, o fator de utilização é majorado devido a introdução, em refinarias com capacidade de hidrotratamento (HDT) e mesmo de craqueamento catalítico fluido (FCC), de coprocessamento de óleo vegetal, óleo residual (UCOS) e óleo de pirólise, alcançando, em 2050, em torno de 10% de conteúdo de biomassa nos *inputs* do coprocessamento. Outra tendência observada é que, no final do período, as refinarias aumentam seu rendimento em produtos petroquímicos, refletindo o perfil de consumo de derivados de petróleo (para fins não combustíveis) em uma economia de baixo carbono.

5.3. Biocombustíveis Líquidos

O Brasil tem uma série de atributos que o qualificam a uma posição de destaque no mercado da bioenergia em escala mundial. O país recebe intensa radiação solar o ano inteiro, possui uma das maiores reservas de água doce do planeta além de extensas áreas de terras que podem ser dedicadas à agricultura energética. Em muitas áreas do país, é possível fazer múltiplos cultivos, sem irrigação em um ano, permitindo a produção de alimentos e o estabelecimento de uma cadeia pujante de bioenergia.

O Brasil vem, há décadas, empregando políticas públicas orientadas para o uso da bioenergia como instrumento de segurança energética e descarbonização da matriz de combustíveis. Historicamente destacam-se quatro marcos na inserção dos biocombustíveis no Brasil: primeiramente em 1975 foi lançado o Programa Nacional do Alcool, o PROALCOOL, décadas depois, em 2003, foi implementada a tecnologia

flex-fuel e logo após, em 2005, foi introduzido o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Em 2017, foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio), que tem uma visão mais ampla da importância estratégica de todos os biocombustíveis no atendimento das NDCs brasileiras.

A adoção, com sucesso, das políticas públicas levou o setor privado a desenvolver uma importante cadeia produtiva de biocombustíveis, com destaque para o etanol e biodiesel. Com efeito, no Brasil, cerca de 25% do uso energético do setor de transporte é atendido por fontes renováveis, enquanto a média global é abaixo de 5%.

A cana de açúcar, atualmente, é a principal matéria-prima para a produção de etanol. No ano de 2021 foram processadas 581 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no ano, resultando na produção de etanol de 29,9 bilhões de litros (MAPA, 2022). Com 361 unidades sucroenergéticas em operação em dezembro de 2021, o país apresenta uma capacidade de moagem efetiva de cerca de 735 milhões de toneladas (MAPA, 2022). Além disso, observa-se o aumento considerável da produção de etanol de milho. Em 2021, havia 20 unidades de etanol de milho em operação, com capacidade total de processamento de 15,3 milhões de toneladas de milho por ano e a de produção de etanol de 4,2 bilhões de litros/ano (EPE, 2022).

Já a produção de biodiesel, em 2021, foi de 6,8 bi litros, representando cerca de 54% da capacidade instalada (12,3 bi de litros) das 53 usinas autorizadas. A soja é a matéria prima mais importante para a produção de biodiesel respondendo por 72% da matéria-prima total, seguida da gordura bovina e materiais graxos (20% do total).

Como resultado desta combinação de recursos naturais, políticas públicas estratégicas e investimentos privados, a gasolina brasileira (com 27% de etanol na sua composição) é uma das que menos emite GEE no mundo.

Como resultado desta combinação de recursos naturais, políticas públicas estratégicas e investimentos privados, a gasolina brasileira é uma das que menos emite GEE no mundo.

Além do etanol anidro, o país também utiliza etanol hidratado em veículos flex. O sucesso no uso do etanol, em complemento à gasolina, possibilita o atendimento de cerca de 50% da demanda do ciclo Otto com biocombustíveis. Nos veículos pesados, atualmente temos 10% de biodiesel misturados ao diesel fóssil e, com o atendimento da política em vigor, este teor alcançaria 20% em 2028.

Uma das grandes vantagens estratégicas dos biocombustíveis líquidos é a possibilidade de aproveitar, em parte, a infraestrutura instalada para os combustíveis fósseis. Adicionalmente, apresentam uma densidade energética elevada possibilitando descarbonizar setores de difícil eletrificação, como o transporte de carga a longa distância e processos industriais.

Na busca da neutralidade climática, além do etanol e biodiesel, novos biocombustíveis, tais como, o diesel verde (ou diesel biocombustível), o bioquerosene de aviação (ou biojet), a gasolina verde e os biocombustíveis para uso marítimo se apresentam como possíveis substitutos aos seus similares de origem fóssil.

Neste estudo, ganham destaque os biocombustíveis avançados (produtos *premium* em relação aos derivados de petróleo, mas oriundos da biomassa), como o diesel verde e o bioquerosene de aviação, que despontam como duas possibilidades de substi-

tuição aos combustíveis fósseis tradicionais. Esses biocombustíveis podem ser produzidos por meio de diversas rotas, conforme indicado na figura 1 abaixo para o biojet.

FIGURA 1 ROTAS DE PRODUÇÃO PARA BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO OU BIOJET



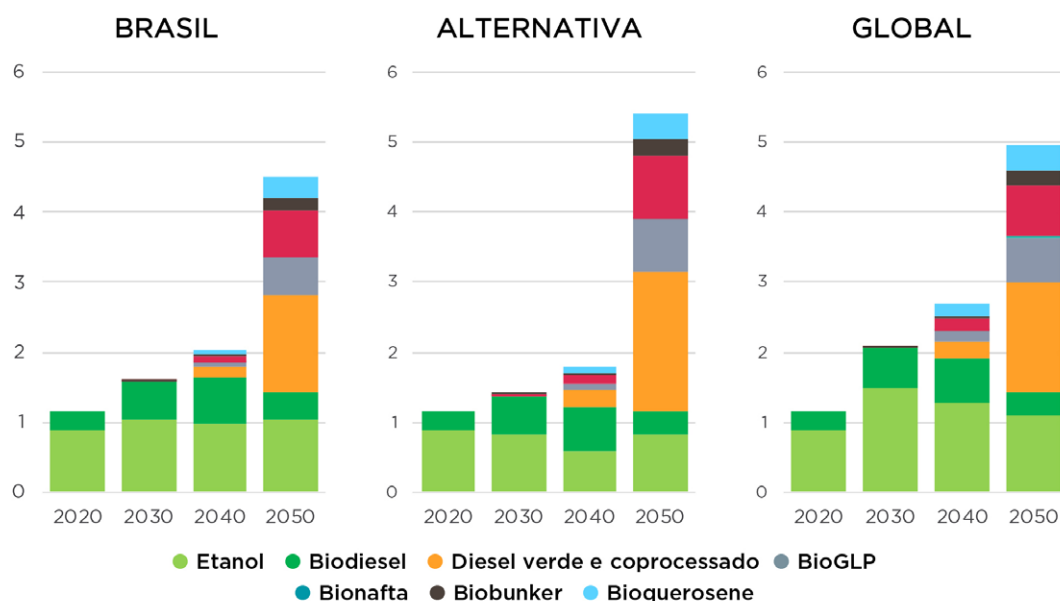
Fonte: Irena, 2021

Nos cenários analisados, a rota escolhida para produção de combustíveis avançados foi pela conversão termoquímica da biomassa via gaseificação e Síntese de Fischer-Tropsch (FT). Neste processo são obtidos biocombustíveis de alta qualidade. Além do biojet, o diesel renovável, o *biobunker* para transporte marítimo, gasolina, nafta petroquímica, bioGLP, também podem ser produzidos. Além disso, da mesma forma que o etanol e o biodiesel, eles possibilitam o aproveitamento da infraestrutura existente - para o transporte, distribuição e abastecimento - utilizada pelos combustíveis fósseis, o que representa uma facilidade para a pronta aplicação dessa tecnologia no mercado.

Cabe destacar que apesar do exercício de otimização priorizar a rota de gaseificação e Fischer-Tropsch, esta tecnologia ainda não está plenamente desenvolvida para biomassa, demandando esforços adicionais de P&D para que alcance a maturidade em escala industrial. A rota HEFA, isto é, um processo de óleo vegetal hidrotratado, por sua vez, já possui comprovação em diversos projetos com foco na produção de diesel verde (HVO) e já está sendo utilizada nos primeiros projetos de produção de biojet. Esta rota, entretanto, tem como principal desvantagem utilizar praticamente as mesmas matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel.

O gráfico seguinte traz a produção de biocombustíveis nos cenários analisados. Primeiramente, é importante ressaltar que o gráfico é não aditivo, ou seja, alguns dos biocombustíveis apresentados são utilizados como insumo para a produção de outros. Como por exemplo, o caso da nafta biocombustível que é utilizada como insumo para a composição do *blend* de querosene biocombustível²⁰.

20. Os gráficos estão em exajoule (EJ) em virtude da diferença de poder calorífico e densidade dos diversos biocombustíveis. No etanol hidratado, por exemplo, 1EJ representa cerca de 50 bilhões de litros. Já para o diesel, seriam cerca de 28 bilhões de litros.



Analisando os resultados da modelagem é possível tecer alguns comentários sobre as alternativas de descarbonização nos diferentes cenários:

- Os biocombustíveis são fundamentais na trajetória de descarbonização do país.
- Os biocombustíveis convencionais (etanol e biodiesel) crescem em quase todos os cenários. Em paralelo, os biocombustíveis avançados ganham maior relevância reduzindo o crescimento dos convencionais. No TA tem um ligeiro declínio (2%) em função da maior eletrificação da frota e da necessidade de maior quantidade dos avançados para alcançar as metas de descarbonização.
- Os biocombustíveis avançados apresentam um aumento expressivo, em especial na última década, para o atendimento da demanda de diesel..

É interessante destacar que a modelagem integrada indica a utilização de biocombustíveis avançados por dois motivos principais: (i) descarbonização de segmentos do setor de transportes mais difíceis de serem eletrificados, como o aéreo, o marítimo e o transporte de cargas; (ii) captura e armazenamento do CO₂, que permitem gerar abatimento de emissões de outros setores.

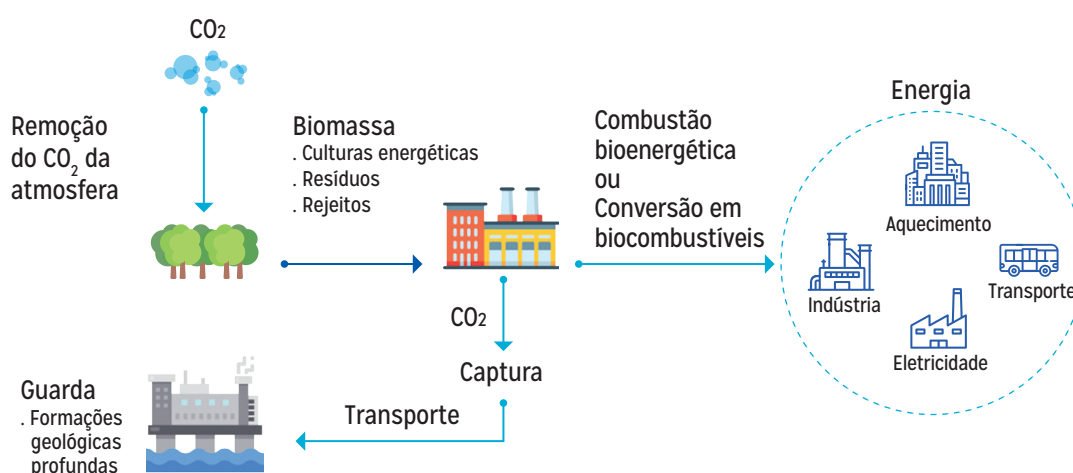
Em cenários de redução de GEE tão desafiadores, como são os casos dos cenários apresentados neste trabalho, toda a emissão de GEE que não possa ser zerada até 2050, precisa ser compensada por emissões negativas por meio de diferentes meios de remoção para que se chegue à neutralidade climática no horizonte desejado.

Neste sentido, os biocombustíveis são uma opção estratégica para o país, já que existem determinados arranjos tecnológicos de produção de biocombustíveis que permitem alcançar emissões negativas, associadas à captura e armazenamento de

CO₂ atmosférico (chamadas de BECCS, do inglês *BioEnergy with Carbon Capture and Storage*), como a síntese do eucalipto ou pinus. Essas plantas capturam grandes quantidades de CO₂ atmosférico durante o seu processo de desenvolvimento, sendo parte armazenada no solo e parte no seu material celular.

Adicionalmente, durante o processo de fabricação do biocombustível, parte do CO₂ pode ser capturado e armazenado. Sendo assim, no ciclo de vida de produção do *feedstock* e posterior conversão para biocombustíveis, há uma remoção líquida de CO₂ da atmosfera, já que o CO₂ capturado no crescimento das árvores de pinus e eucalipto não será integralmente devolvido à atmosfera quando o biocombustível for utilizado em motores. Este processo é ilustrado na figura a seguir.

FIGURA 2 PROCESSO ESQUEMÁTICO DE BECCS



Fonte: IRENA, 2020 baseado em Global CCS Institute, 2019

No caso dos combustíveis fósseis, a introdução de CCS permite no máximo emissões ligeiramente positivas, devido aos limiares técnicos da eficiência de captura do gás carbônico nos processos industriais.

Por conta dessa capacidade de remover carbono, a produção de biocombustíveis passa a ter grande importância na estratégia de neutralidade em carbono do país, distinta do papel que desempenham hoje, em que o etanol e o biodiesel contribuem para abater emissões do segmento de transporte. A centralidade dos BECCS no alcance da neutralidade de carbono no país é evidenciada pelos volumes de carbono capturados, que alcançam 274 e 369 milhões de toneladas de CO₂, em 2050, nos cenários TB e TG, respectivamente.

Trata-se de um grande desafio na medida em que, em setembro de 2021, todo o CO₂ capturado e transportado mundialmente, de base fóssil ou não fóssil (vasta maioria do primeiro caso), não chegava a 37 milhões de toneladas por ano (Mtpa), distribuídos em 27 instalações, conforme GLOBAL CCS INSTITUTE (2021). Os projetos em desenvolvimento para implementação nos próximos anos estão fortemente concentrados em combustíveis fósseis, à exceção de três plantas previstas para os EUA, associadas à produção de etanol, cuja capacidade somada não totaliza 1,5 Mtpa.

Cabe ressaltar que a viabilização dos BECCS demanda enormes esforços técnicos e econômicos que precisam ser superados, sendo este um dos maiores desafios para concretização dos cenários de neutralidade.

A fim de verificar os impactos da não viabilização dos BECCS, no cenário TA colocou-se a restrição à entrada de arranjos de captura e estocagem de carbono. Não obstante, os biocombustíveis celulósicos continuam tendo uma participação importante na descarbonização do transporte. De fato, considerando o menor espaço para manutenção de emissões de combustíveis fósseis a ser abatido, neste cenário, os biocombustíveis celulósicos são usados em maior proporção do que nos demais cenários, substituindo maiores volumes de derivados de petróleo.

Destaca-se que nas próximas três décadas, os biocombustíveis avançados (especialmente associados com CCS), podem configurar uma grande vantagem competitiva do Brasil, especialmente considerando a disponibilidade de terra, os rendimentos agropecuários favoráveis e a experiência nacional no tema. Os biocombustíveis avançados podem representar um investimento estratégico na transição para uma economia de baixo carbono para diversos setores, como o setor industrial, não só como energia, mas também como insumo para produção de petroquímicos. A aplicação mais ampla dos biocombustíveis é no setor de transportes, onde podem promover uma descarbonização com menor necessidade de alteração da infraestrutura existente e menor impacto do perfil de consumo (como no caso de veículos elétricos a bateria).

Destaca-se que nas próximas três décadas, os biocombustíveis avançados podem configurar uma grande vantagem competitiva do Brasil, especialmente considerando a disponibilidade de terra, os rendimentos agropecuários favoráveis e a experiência nacional no tema.

No que tange a factibilidade do suprimento, especialmente de biocombustíveis avançados, o setor agropecuário pode dar uma importante contribuição com a diminuição da área de pastagem degradada, reduzindo assim as pressões sobre áreas de vegetação natural devido à necessidade de expansão de terras agricultáveis para a produção de biocombustíveis no cenário TB, TA e TG. Essa é uma estratégia ótima encontrada no modelo dentro de uma ótica de mínimo custo.

Além disso, outro ponto de destaque é o aumento da participação de sistemas integrados (ILP) e agroflorestais, em 2050, que passou de 7,0 milhões de hectares no cenário BAU para até 25 milhões de hectares no cenário TA. Esse tipo de sistema é importante, visto que ele permite a implementação de diferentes cultivos e criações em um mesmo território.

Por fim, pode existir correlação entre os investimentos da cadeia de O&G e dos biocombustíveis, seja na cadeia logística, seja em investimentos de unidades de processamento. Assim, existem riscos e oportunidades, ora conflitantes, ora complementares nas duas cadeias, que podem impactar a oferta e os custos dos biocombustíveis. Esses temas merecem ser avaliados criteriosamente.

5.4. Hidrogênio e Biometano

O hidrogênio (H_2) apresenta uma versatilidade importante no contexto da transição energética para uma economia de baixo carbono, podendo ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo ou nulo carbono (a depender de seu processo de produção, com captura ou oriundo de fontes renováveis), em setores de difícil descarbonização ou como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada das renováveis intermitentes como a eólica e a solar.

Pode ser o elo que permite que a acelerada redução de custos da geração renovável também alcance os setores em que a eletrificação direta ainda não é possível. Além disso, permite conectar países com alto potencial de geração de energias renováveis, como o Brasil, com mercados demandantes de energia em outros continentes.

Alguns fatores indicam que pode-se estar iniciando uma fase de robusto crescimento para efetivação de uma economia do hidrogênio: i) a redução dos custos das renováveis para produção de hidrogênio de baixo carbono; ii) o posicionamento favorável à economia de hidrogênio por parte de vários governos e grandes *players* industriais, iii) avanços tecnológicos com impactos positivos sobre a competitividade do hidrogênio, indicando que o hidrogênio pode assumir um percentual significativo da energia de baixo carbono no futuro²¹.

Face ao exposto, o hidrogênio nos últimos anos vem ganhando importância nos debates sobre transição energética. Ele pode ser produzido a partir de diversas fontes de energia, como eletricidade, gás natural, biomassa (via eletricidade, gaseificação ou reforma, dependendo da biomassa e da cadeia de conversão), etc. Como a sua utilização não libera CO_2 diretamente na atmosfera, vem sendo considerado um importante vetor para a transição energética.

O Brasil tem uma vantagem competitiva, figurando entre os países mais bem posicionados para a produção de hidrogênio de baixo carbono, inclusive renovável a partir de eletrólise.

Nesse contexto, o Brasil tem uma vantagem competitiva, figurando entre os países mais bem posicionados para a produção de hidrogênio de baixo carbono, inclusive renovável, a partir de eletrólise.

Com uma matriz elétrica 85% composta

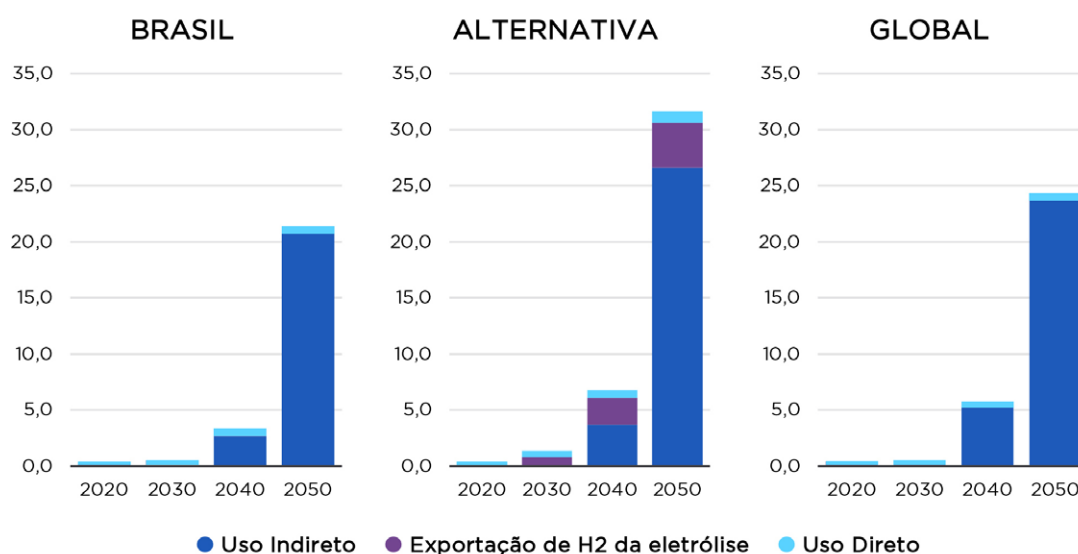
por fontes renováveis, o Brasil é o terceiro país no mundo que mais gera eletricidade renovável. Ademais, parte relevante da nova capacidade que tem sido adicionada ao sistema provém da geração eólica e solar com custos cada vez mais atraentes. Além disso, com um sistema de transmissão que conecta a maior parte do país, engendra-se a possibilidade de desenvolver projetos de produção de hidrogênio conectados ao *grid* que, além de permitir um melhor dimensionamento e maior fator de utilização dos eletrolisadores, possibilita a eventual venda e compra de eletricidade excedente.

Nesse estudo, encontrou-se que a produção de hidrogênio no Brasil pode alcançar, em 2050, um potencial que varia entre 21-32 milhões de toneladas, um volume bastante expressivo. Contudo, a maior parcela deste volume é obtida de forma indireta, isto é, quando o H_2 é utilizado como vetor intermediário para outras aplicações, como a produção de gás de síntese e a utilização em pilhas (na tradução, amiúde tratadas como células) a combustível, alimentadas por etanol.

21. Desafios e Oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio Verde - E+ Transição Energética (emasenergia.org).

GRÁFICO 23

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (EM Mt)

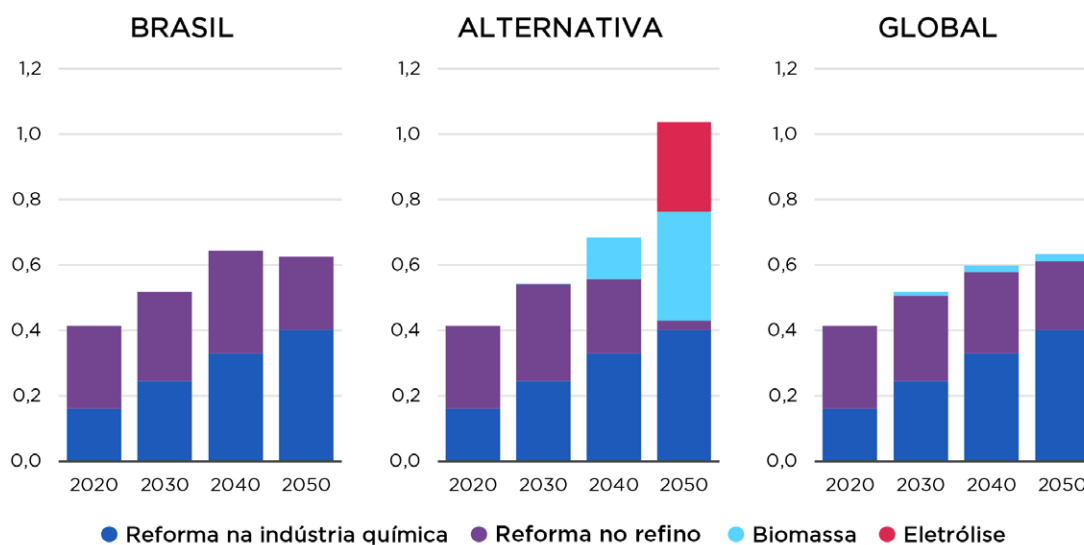


Nos cenários TB e TG, a produção de H_2 alcança, em 2050, 21 e 25 milhões de toneladas, respectivamente. No cenário TA, a produção de H_2 atinge 32 milhões de toneladas em 2050, possibilitando além da produção para uso doméstico, volumes destinados à exportação, obtidos diretamente por eletrólise.

Para a produção direta de hidrogênio utilizada domesticamente, encontra-se uma estabilidade entre os cenários, variando entre 0,6 e 1 milhão de toneladas, obtidas especialmente por meio da reforma do gás natural. Para o cenário TA, além da reforma do gás natural, aparecem opções de produção de H_2 a partir da biomassa e a da eletrólise. O gráfico abaixo mostra as formas diretas de produção de H_2 para os cenários.

GRÁFICO 24

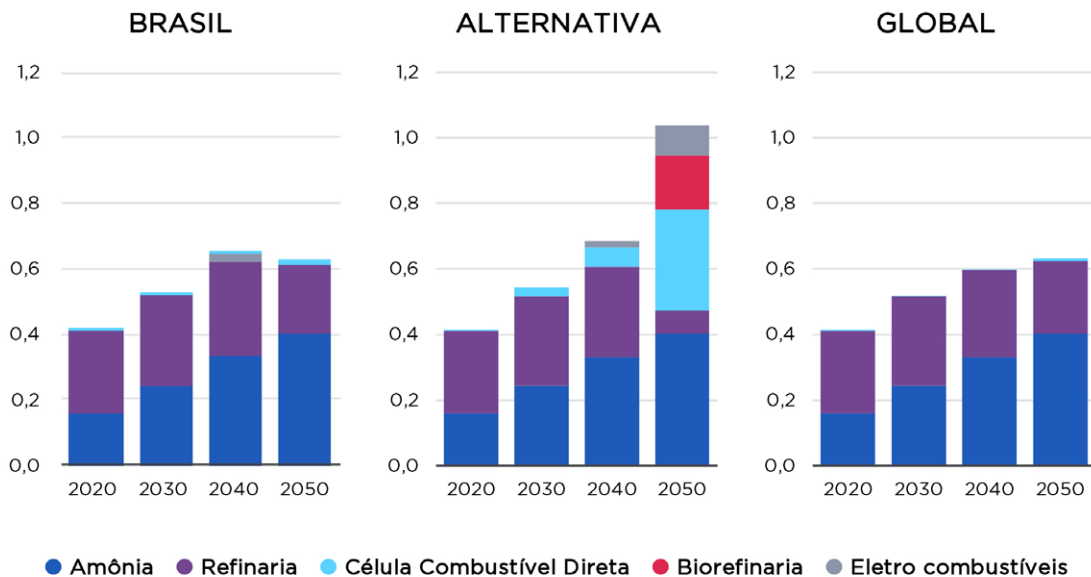
FORMAS PRODUÇÃO DIRETA DE HIDROGÊNIO (EM Mt)



O gráfico acima detalha as aplicações diretas do hidrogênio em cada cenário. Conforme pode ser visto, as aplicações em refinarias (para especificação de combustíveis) e na indústria química (produção de amônia) são os destinos principais. No cenário TA, o H₂ também é utilizado para a produção de combustíveis avançados, os eletrocombustíveis, e diretamente em pilhas a combustível no setor de transportes.

GRÁFICO 25

USOS DIRETOS DO HIDROGÊNIO (EM Mt)



Outro combustível em estado gasoso com um importante papel a desempenhar nos cenários de transição energética é o biometano. Espera-se que ambos, hidrogênio e biometano, desloquem gradativamente o gás natural de origem fóssil.

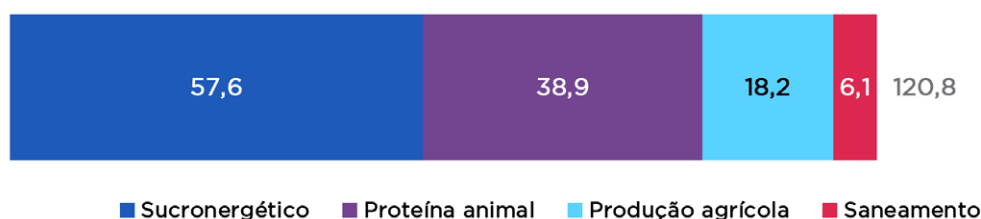
O biometano é o combustível gerado a partir do tratamento do biogás, combustível gasoso oriundo da decomposição de materiais orgânicos (de origem vegetal ou animal). Essa mistura de gases, composta majoritariamente de metano, após um processo de purificação, torna-se intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações e pode ser transportado também de forma semelhante, via malha de gasodutos misturado ao gás natural ou via compressão ou liquefação (Bio-GNL).

O Brasil tem um elevado potencial de biogás e, portanto, de biometano. Segundo a Abiogás, conforme mostrado no gráfico abaixo, o potencial de biogás pode alcançar 120 milhões m³/dia. Se todo esse potencial fosse tratado, o potencial de biometano seria da ordem de 73 milhões m³/dia (considerando uma média de 60% de metano no biogás).

O Brasil tem um elevado potencial de biogás e, por consequência, de biometano.

GRÁFICO 26

POTENCIAL DE BIOGÁS POR DIA (EM m³)



Fonte: ABiogás, 2021

Atualmente, o principal uso do biogás é para geração de energia elétrica. O tratamento do biogás para consumo de biometano em substituição ao gás é ainda incipiente. Segundo a CIBiogás, em seu documento “Nota Técnica 001/2021 – Panorama do Biogás no Brasil 2020”, conforme a tabela 6 abaixo, 19% do volume de biogás teve destino classificado como prioritariamente destinado à produção de biometano.

TABELA 6. USO DO BIOGÁS PARA FINS ENERGÉTICOS EM 2020

PRINCIPAL APLICAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS	NÚMERO DE PLANTAS		VOLUME DE BIOGÁS (M³/ANO)	
Energia elétrica	543	85%	1.328,3	73%
Energia térmica	81	13%	148,6	8%
GNR/Biometano	8	1%	334,7	19%
Energia mecânica	6	1%	7,5	0,4%
TOTAL	638	100%	1.829,1	100%

A regulamentação do biometano vem evoluindo de forma a fomentar o uso desta fonte. A nova Lei do Gás (14.134/21) e seu decreto regulamentador (Decreto 10.712/21), estabeleceram que os gases intercambiáveis com o gás natural poderão receber tratamento equivalente para todos os fins, desde que aderentes às especificações da ANP, enquanto a Lei do Gás anterior tratava apenas do gás natural de origem fóssil.

Além disso, em março de 2022, foi publicado o Decreto nº 11.003/22, que criou a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, com o objetivo de incentivar o seu uso como fonte renovável de energia.

De forma a explorar um cenário onde esses movimentos em prol do biometano se tornassem realidade, no cenário TA foi adotado como premissa que sua produção seria de ao menos 10 milhões de Nm³/dia, a partir de 2030. Entretanto, foi possível observar que, de forma econômica, o modelo adota um uso superior a esse montante. Em 2040, neste cenário, o volume de biometano alcança 13,4 M m³/dia.

TABELA 7. PRODUÇÃO DE BIOMETANO POR CENÁRIO

	BIOMETANO (M m ³ /dia)			BIOMETANO + CCS (M m ³ /dia)		
	BRASIL	ALTERNATIVA	GLOBAL	BRASIL	ALTERNATIVA	GLOBAL
2025	-	-	-	-	-	-
2030	-	-	-	-	-	3,9
2035	0,1	6,5	-	0,6	-	11,3
2040	0,1	13,4	-	6,5	-	17,1
2045	0,1	17,6	-	15,2	-	18,2
2050	-	17,2	-	16,9	-	17,8

De fato, o biometano se mostra uma fonte importante para o atingimento das metas climáticas, com uma produção figurando entre 17 e 18 M m³/dia nos três cenários.

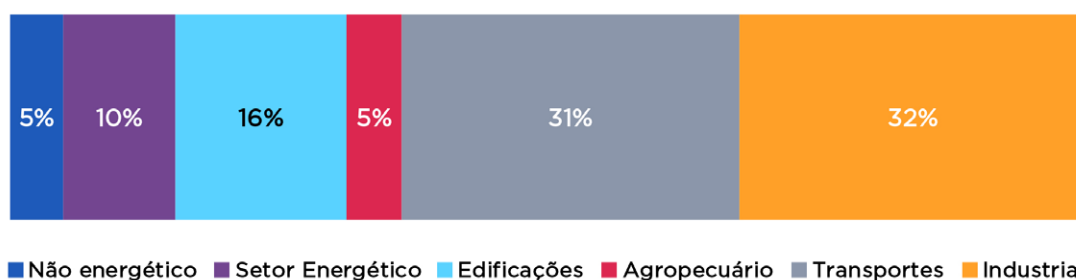
Nos cenários TB e TG o modelo associa a produção do biometano com a tecnologia de CCS, gerando emissões negativas de CO₂. Como o cenário TG faz um uso antecipado da fonte com relação ao cenário TB: em 2040 já apresenta produção de 17 M m³/dia, o que é bastante desafiador. O cenário TA, por sua vez, conta com uma restrição de uso do CCS, por definição; mesmo assim, alcança 17 M m³/dia em 2050, com uma curva de produção entre a dos cenários TB e TG. ■

Demanda

O uso final, agregado energético que reflete mais adequadamente a demanda já que contabiliza os energéticos que chegam diretamente ao consumidor, se eleva, conforme o cenário, entre 35 e 42% ao longo do horizonte de projeção. Em 2020, os derivados de petróleo representavam quase 40% do uso final de energia, constituindo a principal fonte utilizada pelos consumidores para satisfazer suas necessidades de energia.

Contudo, como esperado, em todos os cenários de neutralidade climática os derivados perdem participação até 2050, com destaque para o cenário TA onde, devido à opção de descarbonização via eletrificação, a participação dos derivados, em 2050, se reduz a apenas 19% do uso final. Por outro lado, com a ampla disseminação dos biocombustíveis no setor de transportes, os derivados de biomassa ganham expressiva participação, entre 33 e 38%, ocupando assim a posição de destaque que hoje cabe aos derivados de petróleo.

As emissões decorrentes do uso de energia no Brasil correspondem a cerca de 18% das emissões totais. A desagregação setorial do uso final de energia, ilustrada no gráfico abaixo, ajuda a compreender melhor o potencial de contribuição de cada segmento para o sucesso das metas climáticas. Os principais segmentos econômicos que respondem pelo uso final de energia e, conseqüentemente pelas emissões decorrentes desse uso, são o setor de transportes, o setor industrial e, em menor escala, os setores de edificações, energético e agropecuário.



Fonte: BEN - Balanço Energético Nacional

A descarbonização desses setores enfrenta ao menos três grandes desafios: (1) a tendência esperada de crescimento na demanda por serviços energéticos em cada um desses segmentos, ou seja, mantendo o padrão atual de uso, a tendência seria de ampliação das emissões e não de diminuição; (2) para algumas aplicações, as soluções tecnológicas para mitigar emissões ainda precisam de desenvolvimento e escala; (3) seus custos de implantação ainda são elevados e mecanismos de financiamento e incentivo se mostram incipientes.

6.1. Setor de Transportes

O atingimento das metas de redução de emissões²² impõe uma diminuição drástica no consumo de combustíveis fósseis no Brasil. Isso afeta diretamente o setor de transportes, que junto com a indústria, responde por quase dois terços da energia final consumida no Brasil. Em que pese a ampla utilização de biocombustíveis no Brasil, os combustíveis fósseis, como diesel, gasolina, gás natural, óleo combustível e querosene de aviação, são atualmente predominantes, representando três quartos do volume total de combustíveis utilizados no setor, em 2020²³.

Em face ao imperativo de descarbonização do setor, duas alternativas tecnológicas se apresentam de forma inequívoca: (i) a eletrificação da frota por meio da substituição dos veículos atualmente em circulação; e (ii) a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis. Ressalte-se que essas alternativas podem se complementar não só em nichos distintos de mercado (luxo x econômico), mas também se combinar (veículos híbridos flex, veículos a célula combustível de etanol etc.).

No Brasil, a existência de uma indústria de biocombustíveis consolidada ao longo de décadas, combinada a uma rede de abastecimento de abrangência nacional, a presença de políticas públicas de estímulo aos biocombustíveis e a uma elevada participação de veículos *flexfuel* na frota de leves delineia uma peculiaridade para o país, que conta com soluções de descarbonização que antecedem em muitos anos o pro-

22. De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2020, as emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes no Brasil somaram 185,5 milhões de toneladas de CO₂ eq. O que representa 8,6% das emissões totais do país em 2020.

23. De acordo com o Balanço Energético Nacional ENE (2022), os combustíveis fósseis responderam por 75% do consumo final do setor transportes em 2020.

cesso de eletrificação, movimento que vem ganhando tração mais recentemente em diversas regiões do mundo²⁴. Contudo, se por um lado o país já conta com soluções locais que têm permitido alcançar baixos níveis de emissões de GEE nos transportes, como é o caso da ampla utilização do etanol em veículos *flexfuel*²⁵, por outro, os movimentos e estratégias globais da indústria automotiva apontam cada vez mais para a introdução da eletrificação em seus principais mercados. Esse conjunto de atores com suas próprias estratégias e visões sobre o processo adicionam um aparente dilema à transição no caso brasileiro. Por isso, a importância de desenvolver soluções nacionais que se insiram internacionalmente na cadeia global de valor da indústria automotiva, como, por exemplo, o desenvolvimento de veículos elétricos a célula combustível a partir de etanol e a disseminação da tecnologia híbrido flex para outros mercados (destaque-se, nesse sentido, as negociações entre Brasil e Índia nessas áreas).

As alternativas mencionadas acima são em grande medida complementares, sendo essa característica explorada em cada cenário, levando em conta os condicionantes de políticas públicas, bem como as peculiaridades dos diversos modais e segmentos.

A eletrificação aparece no cenário TA como uma possibilidade mais adequada aos veículos leves, como motocicletas, automóveis e comerciais leves. Usualmente, esses veículos percorrem menores distâncias e são utilizados por menos tempo durante o dia, o que os torna mais facilmente adaptados à rotina de carregamento das baterias,

as quais, no longo prazo, também deverão ter sua densidade energética aumentada proporcionando mais autonomia a estes veículos.

A eletrificação aparece no cenário TA como uma possibilidade mais adequada aos veículos leves, como motocicletas, automóveis e comerciais leves.

Por outro lado, veículos pesados, sobretudo os caminhões de maior porte, enfrentam mais desafios com relação à eletrificação a bateria,

uma vez que percorrem longas distâncias para o transporte de cargas, o que torna mais complexa a logística de recarga dessa frota. Para esse segmento, constituído especialmente por caminhões, aeronaves e embarcações marítimas de longo curso, a alternativa mais adequada seria utilização de biocombustíveis celulósicos com superior prontidão tecnológica, produzidos a partir de biomassa, conforme descrito na seção de oferta de energia. Essa, aliás, é a solução de descarbonização predominante nos cenários TG e TB.

Vale, entretanto, mencionar que no cenário TA, cerca de 40% do transporte coletivo de passageiros²⁶ é atendido por ônibus elétricos, em 2050. Trajetos curtos e previsibilidade de operação são características que tornam esses veículos pesados propícios à eletrificação nesse cenário. Também no cenário TA, projeta-se a penetração de veículos a célula combustível, principalmente no segmento de pesados, onde esse tipo de motorização atende, em 2050, cerca de 1/8 da movimentação de cargas no modal rodoviário.

24. De acordo com o World Energy Outlook (IEA 2022), a participação dos biocombustíveis na demanda mundial do setor transportes em 2020 foi inferior a 4%, enquanto no Brasil essa proporção alcançou os 25% no mesmo ano.

25. De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional ENE (2022), a participação do etanol no suprimento dos veículos leves foi de 43%.

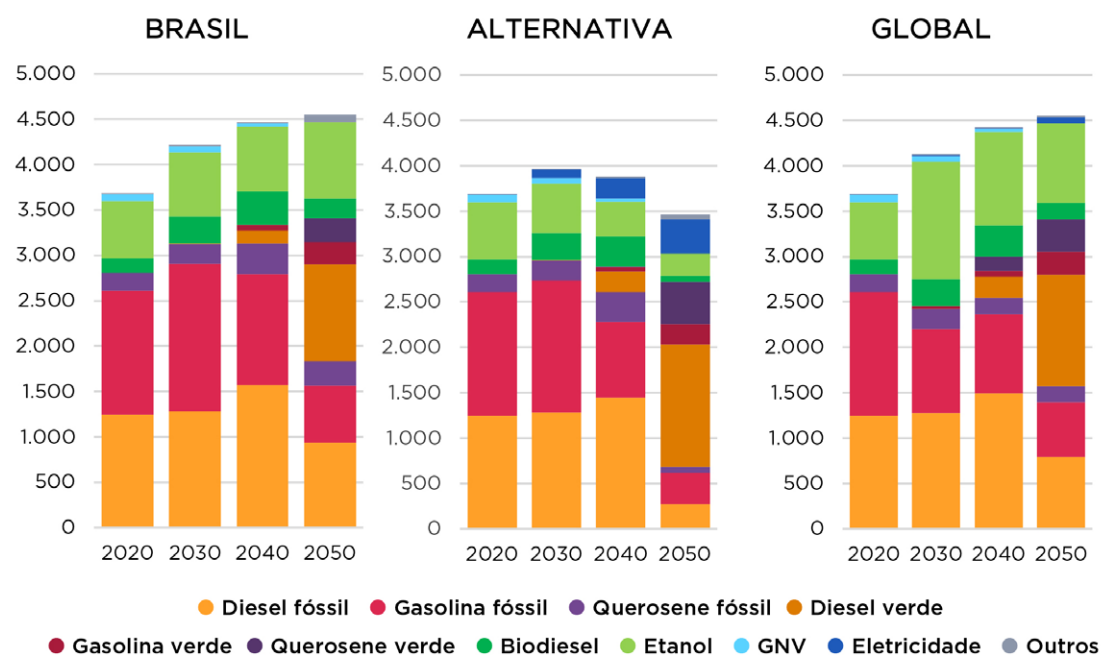
26. Medidos em passageiro quilômetro transportado (pkm).

No que concerne especificamente ao setor de transportes, os cenários TB e TG são praticamente equivalentes, com os dois se caracterizando por soluções de descarbonização baseadas principalmente na participação crescente dos biocombustíveis no suprimento dos veículos.

Já no cenário TA, são exploradas algumas possibilidades de eletrificação do setor de transportes considerando a implantação de políticas públicas na forma de incentivos de natureza tributária à aquisição de veículos e alíquotas reduzidas para licenciamento, além da definição de metas crescentemente restritivas de eficiência e emissões veiculares - como no Programa INOVAR AUTO (concluído) e no Programa ROTA 2030 (em andamento) -, bem como a criação de áreas de circulação preferencial ou restrita, como zonas de baixa e zero emissão.

Dessa forma, o gráfico abaixo apresenta o uso de energia no setor de transportes, que se eleva nos cenários TB e TG, nos quais não há distinções significativas no perfil de uso de energia final do setor. Já no cenário TA, onde as políticas públicas favorecem a eletrificação do setor de transportes de passageiros e de cargas o uso de energia total no setor se reduz em 22%, devido à maior eficiência desse tipo de motorização, com a eletricidade respondendo, em 2050, por 11% da demanda de energia do setor.

GRÁFICO 28 MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE TRANSPORTES (EJ)



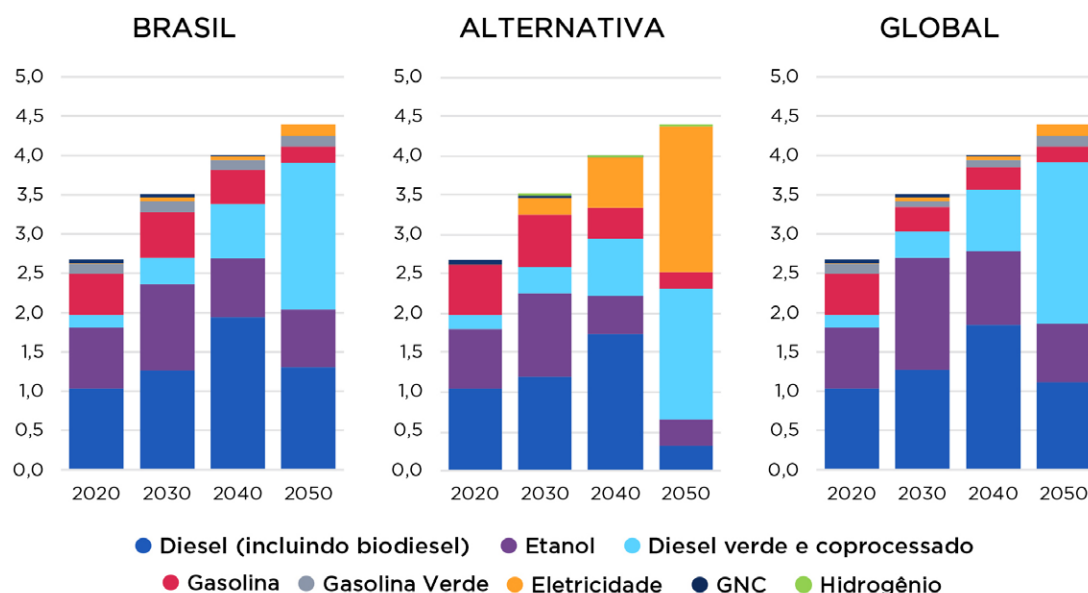
Dada a importância do modal rodoviário na matriz brasileira de transportes, são apresentados detalhamentos para o transporte de passageiros e de cargas nesse modal.

No segmento de transporte rodoviário de passageiros, observa-se, em 2050, nos cenários TB e TG, uma rápida expansão na utilização de biocombustíveis celulósicos, o que permite reduzir emissões, mantendo a composição tecnológica da frota semelhante à tendência atual, com reduzida penetração de veículos elétricos a baterias (BEV). As rotas de descarbonização dominantes nesses cenários (TB e TG) se justificam no caso brasileiro pela competitividade dos biocombustíveis e a maturidade da indústria brasileira de biocombustíveis, o que faz com que a opção por eletrificação a bateria da frota não se apresente como aquela de menor custo. A tecnologia flexfuel continua dominando as vendas da categoria de veículos leves em todo o horizonte de projeção nesses cenários. Ainda nos cenários TB e TG, a participação dos biocombustíveis no suprimento dos automóveis flexfuel chega a 70% em 2050.

Já no cenário TA, verifica-se uma maior participação da eletricidade com a introdução de veículos puramente a bateria (BEV). A participação dos veículos com essa tecnologia de motorização nas vendas totais de automóveis alcança os 40% em 2050 e atende a 43% da demanda desses veículos nesse mesmo ano. A eletrificação não constitui, portanto, a única rota de descarbonização nesse cenário, onde ocorre também uma importante substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis celulósicos em veículos de combustão interna, com atendimento de 40% da demanda por essa fonte²⁷. Nesse movimento de eletrificação do transporte rodoviário de passageiros no cenário TA, se destacam os ônibus urbanos e os comerciais leves, favorecidos pela previsibilidade de seus trajetos e regime de operação, bem como as motocicletas, por sua vida útil curta e seu baixo custo de substituição. O gráfico, a seguir, traz dados sobre o peso de cada combustível no transporte de passageiros.

GRÁFICO 29

PARTICIPAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS NO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS (BI PKM)²⁸



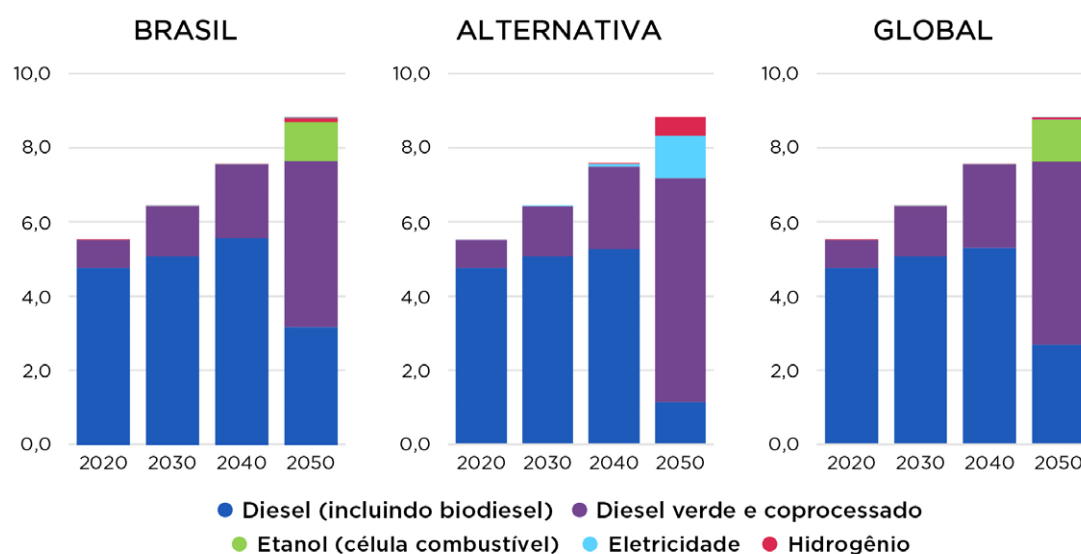
27. Ver ANFAEVA, O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil, 2021. <https://anfavea.com.br/docs/apresentacoes/APRESENTA%3%87%3%830-ANFAVEA-E-BCG.pdf>

28. Bilhões de passageiros-quilômetro transportados. Unidade utilizada para medir a demanda/nível de atividade por mobilidade de passageiros.

O uso de energia do segmento de transporte de cargas concentra-se em caminhões de alta capacidade com longos trajetos. Movimentar cargas por longas distâncias torna a densidade de energia um elemento particularmente importante. A densidade de energia das baterias ainda é significativamente menor do que os combustíveis líquidos, tornando o transporte pesado mais difícil de eletrificar. O gráfico, abaixo, mostra que nos cenários TB e TG as soluções tecnológicas adotadas são semelhantes entre si. As vendas de caminhões a célula combustível de etanol emergem de forma mais intensa a partir de 2040 fazendo com que essa motorização passe a responder, já em 2050, por 11% (TB) e 13% (TG) do suprimento da demanda, contribuindo junto com o diesel verde para substituir o diesel fóssil no segmento.

GRÁFICO 30

PARTICIPAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS NO TRANSPORTE DE CARGA (BI TKM)²⁹



Entretanto, no cenário TA, as vendas de caminhões leves com motorização elétrica se elevam ao longo de todo o horizonte, ganhando tração após 2035 e superando os 80% das vendas em 2050. Pelas razões acima apresentadas, as vendas de elétricos no segmento de pesados avançam, contudo, de forma menos consistente, abrindo espaço para a entrada de veículos a célula combustível H₂ ao longo da década de 2040. No cenário TA, em 2050, o hidrogênio responde 6% de toda a atividade de transporte rodoviário de cargas, enquanto a motorização elétrica alcança os 13%.

29. Bilhões de toneladas-quilômetro transportados. Unidade utilizada para medir a demanda/nível de atividade logística de movimentação de cargas.

GRÁFICO 31

PARTICIPAÇÃO DAS TECNOLOGIAS NAS VENDAS DE CAMINHÕES LEVES

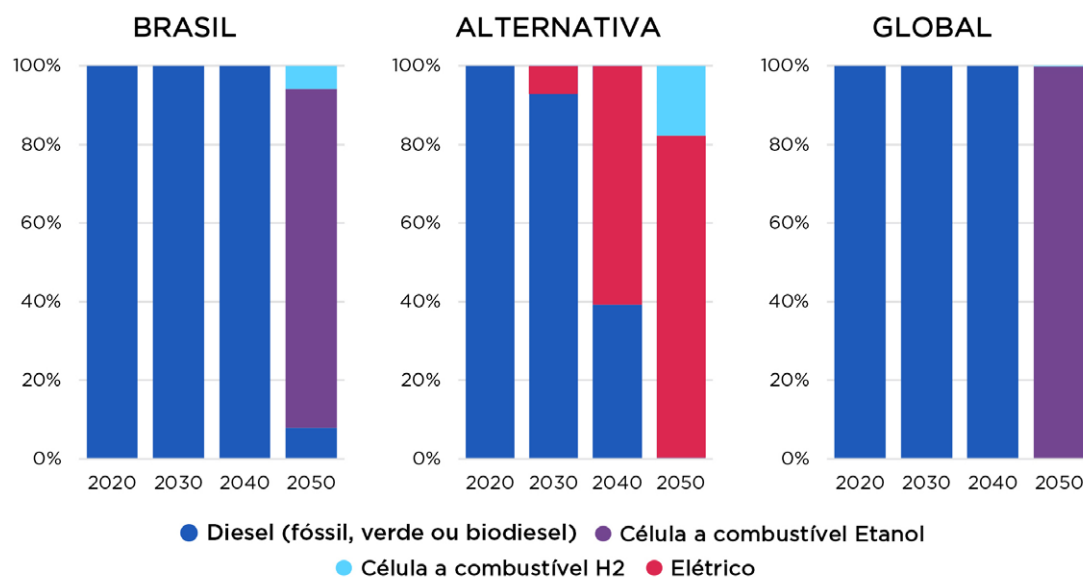
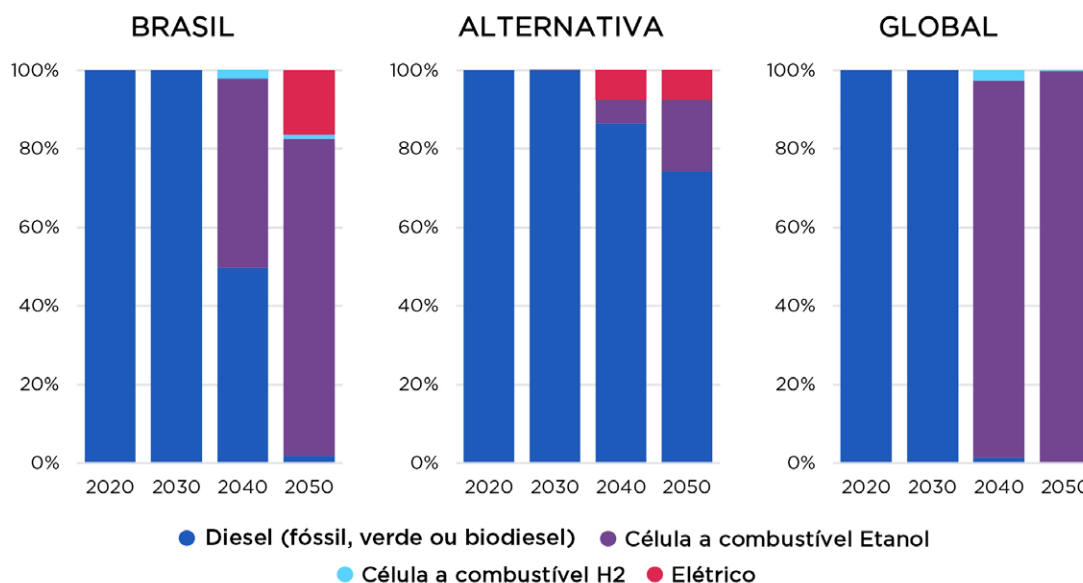


GRÁFICO 32

PARTICIPAÇÃO DAS TECNOLOGIAS NAS VENDAS DE CAMINHÕES PESADOS

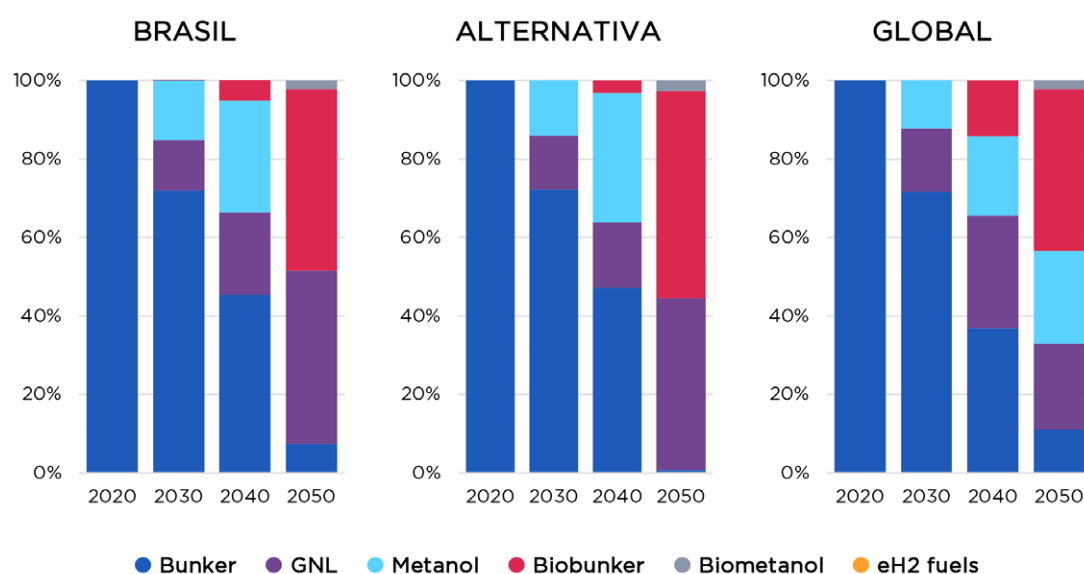


Embora concentre a parcela mais importante das emissões do setor, o modal rodoviário conta com uma cesta relativamente diversa de soluções tecnológicas já disponíveis para viabilizar a descarbonização. O mesmo, entretanto, não se verifica para os modais aéreo e marítimo. Tanto na aviação quanto na navegação é preciso combustíveis com alta densidade energética para reduzir o volume e a massa do combustível transportado. A seleção de alternativas leva em conta a disponibilidade, a densidade energética, a existência de padrões de certificação, a compatibilidade com a frota atual, a infraestrutura de armazenamento, a maturidade tecnológica e a segurança na utilização. No modal aéreo, a eletrificação ainda não se apresenta como alternativa viável para voos comerciais de longos trajetos e o hidrogênio é

uma promessa distante. Nesse modal, os combustíveis *drop in* constituem a alternativa preferencial em todos os cenários, com o bioqueresene representando, em 2050, 64% do suprimento das aeronaves no cenário TB, 86% no cenário TA e 74% no cenário TG.

No modal aquaviário, a descarbonização ocorre por meio de um conjunto um pouco mais amplo de combustíveis substitutos, respeitando também os critérios mencionados acima. No gráfico abaixo fica evidente a importância do metanol e do GNL como alternativas de curto e médio prazo e do *biobunker* como solução de mais longo prazo.

GRÁFICO 33 SUPRIMENTO DO MODAL AQUAVIÁRIO

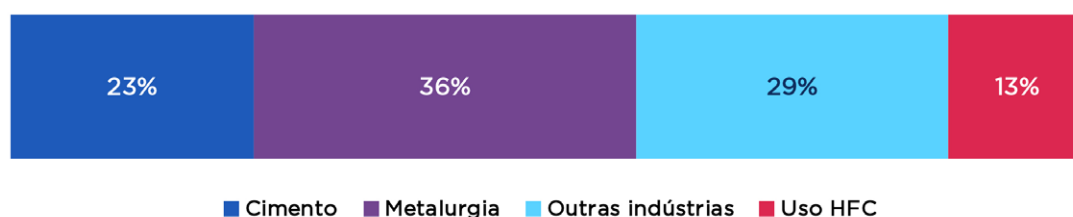


6.2. Setor Industrial

O setor industrial contribui para as emissões totais do país tanto pela queima de combustíveis fósseis quanto por seus próprios processos produtivos. Nesse último aspecto, os subsegmentos que mais emitem são a metalurgia e a fabricação de cimento. Além de serem os maiores emissores, apresentam também os maiores obstáculos tecnológicos à descarbonização, uma vez que as emissões são intrínsecas de seus próprios processos de fabricação. Destaca-se o contraste entre a grande participação do setor de Alimentos e Bebidas no uso de energia, e sua pouca expressividade nas emissões de GEE, já que mais de 80% da energia consumida pelo setor provém de fontes fósseis.

GRÁFICO 34

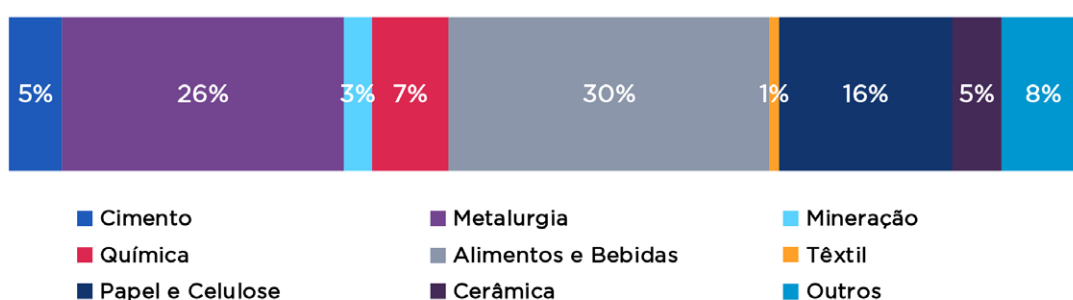
EMISSIONES DE GEE POR SEGMENTO DO SETOR INDUSTRIAL (2020)



Fonte: Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)

GRÁFICO 35

USO FINAL DE ENERGIA POR SEGMENTO DO SETOR INDUSTRIAL (2020)

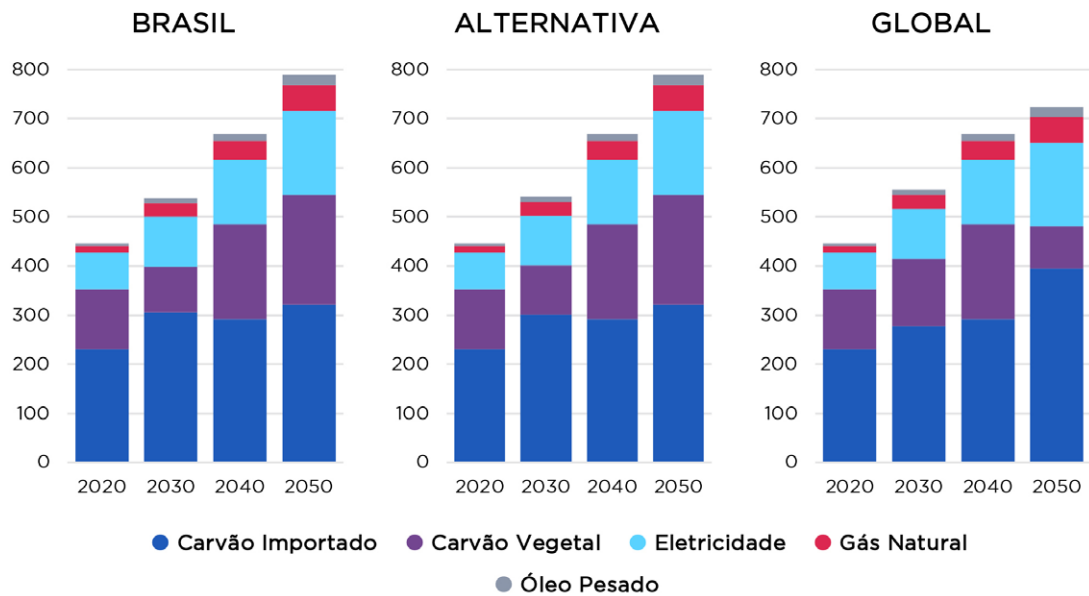


Fonte: Balanço Energético Nacional ENE (2022)

Na siderurgia, principal atividade do segmento metalúrgico, projeta-se, nos cenários TB e TA, a substituição de parte do consumo de carvão mineral por carvão vegetal ao longo da década de 2040. O uso final nos dois cenários, em 2050, é 6% superior ao do cenário BAU em 2050. Esse aumento se dá, principalmente pelo menor poder calorífico do carvão vegetal, reduzindo a eficiência do processo. Já no cenário TG, o uso final apresenta ganhos de eficiência, principalmente pela maior eletrificação do setor. O aço pode ser produzido através de dois processos principais: (i) utilização de altos-fornos integrados (BOF) ou fornos elétricos a arco (EAF). Enquanto as plantas integradas produzem aço a partir de minério de ferro e precisam de carvão como redutor, as plantas com EAF utilizam sucata ou ferro esponja como sua principal matéria-prima. A utilização de EAF favorece a reciclagem e, combinado com o suprimento de eletricidade renovável, tem potencial para mitigar as emissões do setor. Obviamente, essa opção de processo industrial requer alta disponibilidade de sucata, o que é mais usual em economias mais maduras. A opção de produção de redução direta com uso de H_2 , DRI- H_2 , é promissora e merece ser analisada com maior cuidado em futuros estudos.

GRÁFICO 36

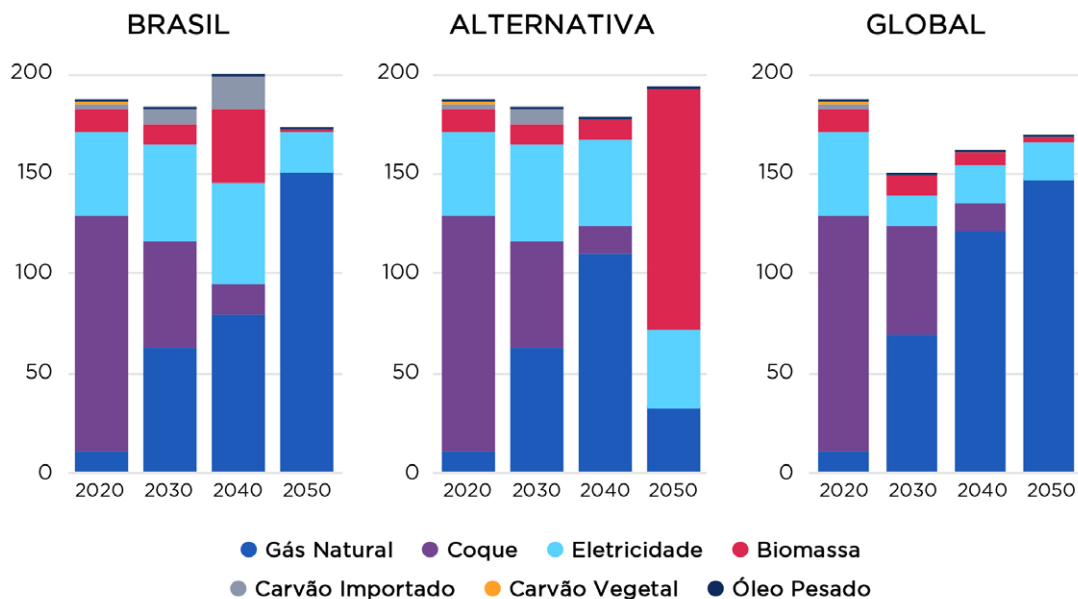
USO FINAL DE ENERGIA NO SEGMENTO SIDERÚRGICO



A descarbonização do setor de cimento é um dos maiores desafios na transição para um setor industrial de baixo carbono devido às emissões intrínsecas ao seu próprio processo de produção. Salvo o surgimento de novas rotas tecnológica de produção, a solução correntemente mais considerada para reduzir as emissões do processo tem sido, quando possível, a captura de carbono (CCS). Adicionalmente, a substituição por fontes mais limpas de energia pode contribuir também para a mitigação das emissões. Na indústria cimenteira, o gráfico mostra que o coque de petróleo, que responde hoje por cerca de 70% do suprimento de energia do setor é substituído integralmente por outros energéticos. Nos cenários TB e TG pelo gás natural e no cenário TA também pela biomassa, dada a limitação ao uso de CCS nesse cenário.

GRÁFICO 37

USO FINAL DE ENERGIA NO SEGMENTO DE CIMENTO



A petroquímica é uma das poucas aplicações para as fontes fósseis, particularmente petróleo e gás natural que oferecem à indústria de óleo e gás alguma resiliência em meio à transição energética. Contudo, a poluição por resíduos plásticos já impõe certos limites a expansão desse segmento. Os plásticos descartáveis têm se tornado cada vez mais prevalentes em todo o mundo. Esses plásticos representam uma ameaça aos ecossistemas naturais e constituem também um vetor para as mudanças climáticas. A situação atual já vem sendo tratada como uma crise global, exigindo uma

A petroquímica é uma das poucas aplicações para as fontes fósseis, particularmente petróleo e gás natural que oferecem à indústria de óleo e gás alguma resiliência em meio à transição energética.

mudança sistêmica na forma como os plásticos são produzidos, consumidos e descartados na economia.

Na petroquímica, a demanda energética, em 2050, de todos os cenários de transição é mais baixa que na situação atual, e caso seja mantida essa tendência. A redução é de 8%, 12,6% e 10,2% para os cenários TB, TA e TG, respectivamente. No

cenário TA, é perceptível a maior participação do etanol (rotas de produção de eteno e butadieno) e da eletricidade no setor e a menor participação do gás natural. Neste caso, merece destaque o fato de que o aumento da produção de bio-eteno torna necessárias rotas capazes de produzir propeno e Benzeno Tolueno e Xileno (BTX), o que pode ser realizado via bio-nafta petroquímica (oriunda de processos *biomass to liquids* como descrito na seção de oferta, para uso em *steam crackers* convencionais) e bio-GLP (idem, mas nesse caso com uso de processos do tipo PDH). As rotas para produção de petroquímicos a partir de matérias primas renováveis já uma realidade no Brasil, a central da Braskem em Triunfo/RS contém uma unidade de produção de eteno verde, produzido a partir de etanol.

6.3. Setor de Edificações

Em 2020, as principais fontes de suprimento ao uso final de energia do setor Residencial foram a eletricidade (47%), seguida pela lenha (27%) e pelo gás liquefeito de petróleo (24%). O setor residencial representa cerca de 70% da demanda total do agregado denominado de edificações.

A posse e o uso crescente de equipamentos, potencializados pela expansão da renda e pela tendência de eletrificação e transformação digital nas edificações, bem como a rápida ampliação na área total edificada em países emergentes como o Brasil, apontam para a elevação da demanda de energia nesses segmentos. Por isso, a eletricidade, que já constitui uma das principais fontes de suprimento no uso final do setor residencial, deve ter sua participação ampliada em todos os cenários. O aumento do poder de compra de uma classe média em expansão representa um importante vetor de crescimento na demanda por energia. O desafio da transição energética será conciliar essa tendência de crescimento da demanda com a sustentabilidade.

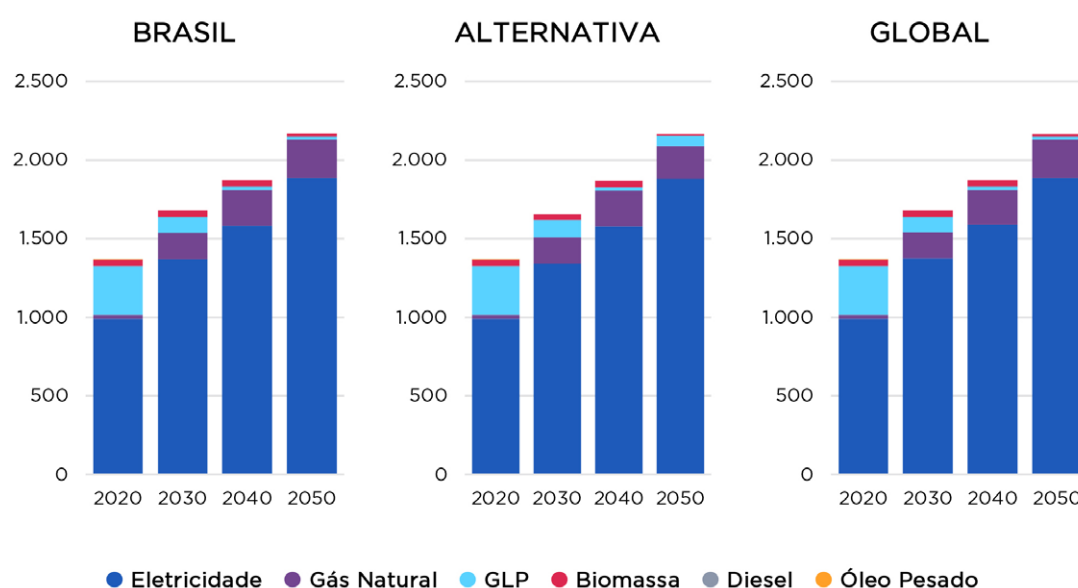
No setor residencial e de serviços não ocorrem variações importantes nos resultados projetados para os cenários. Destaca-se, contudo, o aumento de aproximadamente 60% no uso energético do setor. Embora a eletricidade se consolide como a

fonte mais importante, refletindo a expansão da utilização de equipamentos, outro movimento merece destaque: a forte substituição do gás liquefeito de petróleo (GLP) pelo gás natural para as aplicações de cocção de alimentos e aquecimento. A demanda de gás natural quase que decuplica entre 2020 e 2050 no setor de edificações.

Os resultados não indicam o aumento de consumo de lenha, o que apenas ocorreria diante de problemas sociais de acesso econômico a combustíveis modernos. Logo, os resultados partem da premissa de que esse atual problema deve ser resolvido em cenários que também envolvem ambições de descarbonização da economia.

GRÁFICO 38


EVOLUÇÃO DO USO FINAL DE ENERGIA DO SETOR DE EDIFICAÇÕES (PJ)



No consumo de eletricidade, ressalta-se o acréscimo da geração distribuída (GD) com a ampliação no uso de painéis solares. Em todos os cenários a capacidade instalada de GD alcança o potencial máximo avaliado nesse estudo em 2050, ou seja, 43,2 GW. Vale destacar que o cenário TA alcança esse limite superior cinco anos antes dos demais. ■

Recomendações para Políticas Públicas

7

 Os resultados encontrados nos cenários de descarbonização demonstram a importância de novas políticas, novos instrumentos e vetores energéticos a fim de acelerar a redução de emissões em uma trajetória robusta de neutralidade em carbono.

As tendências delineadas pelos cenários de descarbonização indicam eixos para a política pública: (i) eliminação do desmatamento e potencialização das soluções baseadas na natureza para remoção de carbono; (ii) desenvolvimento dos biocombustíveis avançados (celulósicos, HVO...), com especial atenção aos BECCS; (iii) modernização do setor elétrico e soluções para lidar com um sistema de geração orientado pela expansão por fontes renováveis variáveis; (iv) promover a cadeia de valor e a infraestrutura necessária para eletrificação de segmentos de transportes, considerando a realidade brasileira e as oportunidades de inserção em segmentos globais da indústria automotiva (veículos híbrido flex, veículos célula a combustível a etanol, veículos de entrada ou econômicos a combustão interna que façam uso de e-fuels para mercados de renda mais baixa, por exemplo); (v) prolongar a competitividade dos recursos de óleo e gás natural, por meio da manutenção da tripla resiliência (técnica, econômica e ambiental). Como linha de contorno destes cinco eixos está o fortalecimento do papel do planejamento energético indicativo e integrado de médio e longo prazos, identificando oportunidades no aproveitamento de vantagens competitivas do país e articulando-as em planos nacionais e roadmaps que promovam desenhos de mercado abertos e competitivos (sem trancamentos tecnológicos), bem como ações coordenadas e monitoramento de objetivos, mesmo por caminhos flexíveis.

Para o horizonte até 2030, as principais medidas que devem ser implementadas são, sobretudo, aquelas do setor de uso do solo, devido ao seu menor custo de investimento e grande impacto nas emissões nacionais, com repercussões relevantes sobre o esforço de mitigação após 2030. As mudanças pelo lado do setor energético seriam implementadas de forma gradual, com maior impacto no longo prazo, após 2030. No entanto, também merecem atenção e ensejam um conjunto de políticas que fomentem sua implementação, sobretudo políticas associadas a P&D e ao arcabouço institucional, o que, em parte, já vem ocorrendo³⁰. Abaixo, encontram-se as principais ações, até 2030, que deveriam ser foco de atenção para o sucesso dos cenários de transição energética.

30. Vide Resolução do CNPE nº 2/2021, a Política do RenovaBio, a Política do Novo Mercado de Gás, a Política Nuclear Brasileira, o Programa Metano Zero, o Programa Abastece Brasil, o Programa Combustível do Futuro, o Programa Nacional do Hidrogênio - PNH2, o Programa Rota 2030, o Marco de Saneamento, o Marco de Micro e Mini Geração Distribuída - MMGD, o processo de regulamentação da eólica *offshore*, etc.

1. Adotar agenda de política energética e desenho de mercados que crie condições para caminhos flexíveis de descarbonização, a fim de lidar com incertezas identificadas de cunho tecnológico e de mercado, e aproveitando as sinergias possíveis graças à diversidade de recursos energéticos do país, em linha com a abordagem da NDC do Brasil, que estabelece metas para o conjunto da economia (*economy-wide*);

2. Minimizar arrependimentos mediante abordagens de mercados abertos, diversos e competitivos, bem como permitindo inclusive a combinação e a competição entre soluções tecnológicas diversas (neutralidade tecnológica);

3. Harmonizar objetivos de desenvolvimento sustentável, transição energética e segurança energética, aproveitando o potencial de recursos e as oportunidades de mercado e inovação para o Brasil;

4. Aproveitar vantagens competitivas existentes no Brasil para construir e financiar vantagens competitivas do amanhã, requalificando ativos e migrando expertises no sentido da transição energética de indústrias de O&G, biocombustíveis, renováveis e nuclear. (co-queima com renováveis, novos energéticos descarbonizados, sinergia de projetos com renováveis, novos propósitos para infraestrutura e ativos, financiamento de novos negócios, etc.);

5. Cumprir objetivos/metapas já estabelecidas pelo país em linha com o compromisso de neutralidade climática (líquida), como zerar o desmatamento ilegal até 2028, recuperar áreas degradadas, reduzir as emissões fugitivas de metano, descarbonização de combustíveis, entre outros;

6. Assegurar que o setor energético brasileiro tenha uma transição justa, inclusiva e custo-efetiva, sem que precise contrabalançar emissões de GEE relacionados a uso do solo e florestas e pecuária extensiva, o que implicaria custos mais elevados para a sociedade e a economia brasileira;

7. Aperfeiçoar ou estabelecer arcabouços institucional, legal e regulatório que promovam o desenvolvimento e adoção de tecnologias e modelos de negócios com foco na redução de emissões e remoção de carbono de emissões de gases de efeito estufa. Em particular, é fundamental estabelecer ou aperfeiçoar arcabouços para CCS (chave para BECCS e papel de O&G na transição energética), renováveis para geração elétrica, biocombustíveis avançados, novos energéticos (hidrogênio de baixo carbono, combustíveis sintéticos, etc.), armazenamento de energia e precificação de carbono, bem como para a adoção de novas tecnologias de uso-final (inclusive eletrificação do transporte, novas aplicações nas indústrias etc.).

8. Mapear, detalhar e disseminar informações sobre potencial técnico, econômico e de mercado para as alternativas identificadas nos diferentes cenários. Sobre tudo, CCS, renováveis para geração elétrica, biocombustíveis avançados e hidrogênio;

9. Aprofundar estudos sobre resiliência climática das soluções energéticas encontradas no projeto. Em particular para hidrelétricas, eólica, solar e biocombustíveis (agricultura energética). ■

Apêndice

Metodologia

Incertezas Críticas

O caminho para a construção dos cenários de longo prazo para a Transição Energética no Brasil se iniciou com a identificação das incertezas críticas que condicionam esse processo. Na atividade de elaboração de cenários, “incertezas críticas” são informações, questionamentos, temas ou argumentos cujas definições auxiliam na determinação da dinâmica de todas as outras variáveis que influenciam a evolução dos cenários. Construir cenários por meio de suas incertezas críticas permite diminuir o grau de complexidade do exercício e focar em sua utilização prática, trazendo respostas e *insights*.

O 1º passo na identificação das incertezas críticas do PTE ocorreu por meio de seminários e entrevistas, seguida de uma fase de priorização de informações, realizada através de um exercício de ideação. Nessas interações, que tiveram como pauta central a transição energética, foram destacadas as principais percepções do setor como dúvidas, certezas, desejos e anseios. Foram entrevistados 42 representantes do setor energético dentre empresas, associações, universidades e agências reguladoras. Avaliadas, essas percepções foram consolidadas e classificadas, tornando-se o guia contendo o que de fato os cenários precisariam explicar³¹.

31. A lista completa desses temas está divulgada no documento “Tendências e Incertezas da transição energética no caso brasileiro”, no link: <https://www.cebri.org/br/doc/228/tendencias-e-incertezas-da-transicao-energetica-no-caso-brasileiro>.

Identificação das incertezas

Questionários aplicados aos especialistas presentes nos eventos da 1ª fase do projeto (Fase de Divergência) levantou uma série de incertezas

ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO BRASIL
TRIBUTAÇÃO NO SETOR DE O&G NO BRASIL
EXPANSÃO DA MALHA DE GASODUTOS
MUDANÇAS NAS CADEIAS GLOBAIS DE VALOR
PRECIFICAÇÃO DE CARBONO NO BRASIL
CÉLULA COMBUSTÍVEL A ETANOL

POLÍTICAS PÚBLICAS
PREÇO DO PETRÓLEO
PREÇO DO GÁS NATURAL

O início da 2ª fase do projeto (Fase de Convergência) onde ocorreu o encontro com as empresas trouxe mais uma incerteza

ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO BRASIL
TRIBUTAÇÃO NO SETOR DE O&G NO BRASIL
EXPANSÃO DA MALHA DE GASODUTOS
MUDANÇAS NAS CADEIAS GLOBAIS DE VALOR
PRECIFICAÇÃO DE CARBONO NO BRASIL
CÉLULA COMBUSTÍVEL A ETANOL

PREÇO DO PETRÓLEO
POLÍTICAS PÚBLICAS
PREÇO DO GÁS NATURAL

COMPORTAMENTO DOS STAKEHOLDERS

O processo de validação da 2ª fase com especialistas do CEBRI, EPE e BID trouxe 3 novas incertezas

ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES
PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO BRASIL
TRIBUTAÇÃO NO SETOR DE O&G NO BRASIL
EXPANSÃO DA MALHA DE GASODUTOS
MUDANÇAS NAS CADEIAS GLOBAIS DE VALOR
PRECIFICAÇÃO DE CARBONO NO BRASIL
CÉLULA COMBUSTÍVEL A ETANOL

PREÇO DO PETRÓLEO
COMPORTAMENTO DOS STAKEHOLDERS
POLÍTICAS PÚBLICAS
PREÇO DO GÁS NATURAL

CRESCIMENTO DA RENDA NO BRASIL
MUDANÇAS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO
O PAPEL DO GÁS NATURAL NA TRANSIÇÃO BRASILEIRA

O passo seguinte constituiu-se na identificação das variáveis que sintetizassem todos esses temas e a elaboração de filtros que permitissem reduzir ao máximo o número dessas variáveis. Nessa etapa, utilizou-se pesquisas direcionadas, que buscavam classificar essas informações por meio do grau de impacto e do grau de incerteza. Os temas/variáveis que obtiveram baixo grau de incertezas, foram classificados como ‘tendências’, já aqueles que apresentaram tanto alto grau de impacto, quanto alto grau de incerteza, foram classificados como candidatos a ‘incertezas críticas’, dentre eles:

- Política públicas;
- Mudanças na geografia das cadeias globais de valor;
- Preço do petróleo;
- Preço do gás natural;
- Tributação sobre o setor de petróleo e gás no Brasil;
- Políticas de precificação de carbono no Brasil;
- Eletrificação da frota de veículos leves;
- Célula combustível a etanol;
- Produção de hidrogênio baixo carbono no Brasil;
- Investimentos na expansão da malha de gasodutos;
- Comportamento dos *stakeholders*;
- Crescimento da renda no Brasil;
- O papel do gás natural na transição brasileira;
- Mudanças no setor elétrico brasileiro;
- Emissões fora do uso energético.

O 3º passo visou reduzir o número de variáveis que seriam tratadas e contou com a utilização de uma ‘matriz de impacto cruzado’. O método possibilita filtrar o número de variáveis com as quais irá se trabalhar, privilegiando aquelas com maior capacidade de condicionar ou explicar as demais. A matriz é organizada para descrever o grau de impacto que cada variável posicionada na linha exerce sobre a variável posicionada na coluna. Pontuadas, as linhas que somaram o maior valor foram aquelas em que as variáveis possuem a maior influência sobre as outras. Nesse exercício, seis variáveis se destacaram: i) Políticas públicas; ii) Preço de petróleo; iii) Preço do gás natural; iv) Tributação sobre o setor de óleo e gás no Brasil; v) Políticas de precificação de carbono no Brasil; e vi) Comportamento dos consumidores.

Dessas, foram excluídas as variáveis de ‘Preço de Petróleo’ e ‘Preço do Gás natural’ por terem sido consideradas como resultados dos cenários e não necessariamente inputs para sua elaboração. Além dessas, também foram excluídas as variáveis ‘Tributação sobre o setor de óleo e gás no Brasil’ e ‘Políticas de precificação de carbono no Brasil’, uma vez que elas estão subordinadas à variável de ‘Políticas públicas’³².

Como resultado, e após consenso entre as equipes do CEBRI, EPE e BID, que optou por incorporar o aspecto tecnológico da transição. Dessa maneira, as três incertezas críticas selecionadas foram:

- Políticas públicas;
- Comportamento dos *stakeholders*;
- Difusão tecnológica.

A partir da evolução dessas três variáveis a lógica dos cenários foi criada.

32. Essas variáveis foram excluídas como incertezas críticas, mas isso não quer dizer que serão ignoradas no processo de elaboração dos cenários. Na realidade só está se considerando que as dinâmicas dessas variáveis serão condicionadas pela definição das incertezas críticas.

Priorização das incertezas



O Ponto de Partida

Após a definição das variáveis que condicionaram as trajetórias construídas para cada cenário, é preciso conhecer o ponto a partir do qual os cenários irão se sustentar. A pergunta que se coloca é, então, como chegamos até aqui? Qual é a configuração atual do processo de transição energética, dos mercados de energia, e das forças que o moldaram?

Para isso, destacam-se o papel da Conferência das Partes (COP) das Nações Unidas e o crescimento das energias renováveis.

Como chegamos até aqui?

Qual é a configuração atual do processo de transição energética, dos mercados de energia, e das forças que o moldaram?

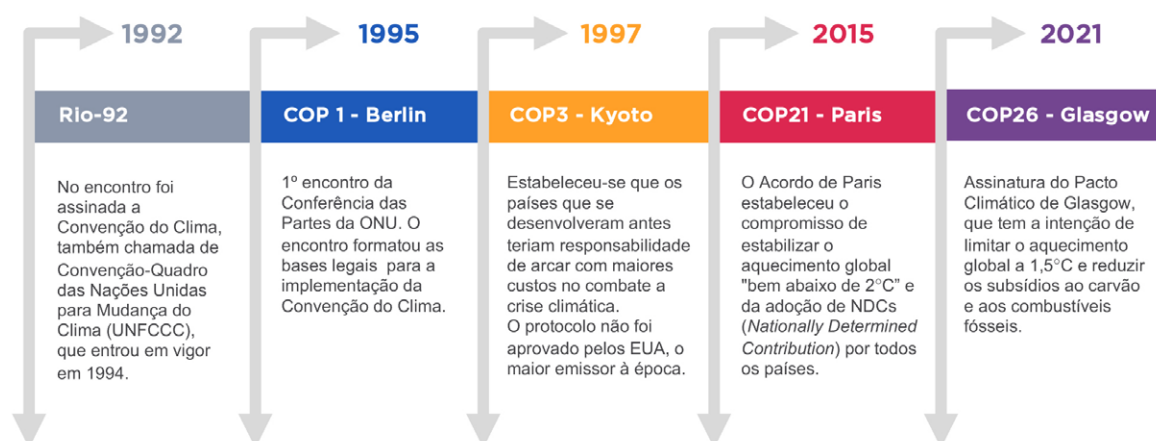
A Conferência das Nações Unidas

Em 1992, o Rio de Janeiro sediou uma Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Vinte anos após a 1ª Conferência de Estocolmo, que representou o início das discussões internacionais sobre o meio ambiente, a chamada “Rio-92”, conseguiu reunir um recorde de quase 180 países para juntos avaliarem os principais problemas ambientais do mundo e debaterem soluções que possibilitassem aliar o desenvolvimento socioeconômico e a preservação ambiental.

O encontro resultou na assinatura da Convenção do Clima, também conhecida por UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*). Essa Convenção consolida os compromissos de todos os países signatários e, apesar de não estabelecer obrigatoriedade no cumprimento das metas voluntariamente apresentadas por cada país, por se tratar de um acordo internacional acaba se configurando em um fator decisivo em agendas de políticas externas.

Após entrada em vigor da UNFCCC, e três anos após a Rio-92, ocorreria a 1ª COP (*Conference of the Parties*). A Conferência das Partes surgiu como um encontro de estado de frequência anual e com o intuito de definir regras globais para implementação das medidas necessárias para o combate à crise climática. O quadro abaixo apresenta os principais marcos da COP nos últimos anos.

FIGURA 3 PRINCIPAIS MARCOS DA CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS



O acordo que dá base aos compromissos assumidos atualmente foi produzido na COP21, em 2015. O chamado ‘Acordo de Paris’ propõe uma reforma da economia mundial a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), e inclui o estímulo a um suporte financeiro e tecnológico por parte dos países desenvolvidos para possibilitar a ampliação das ações que serão realizadas pelos países menos desenvolvidos.

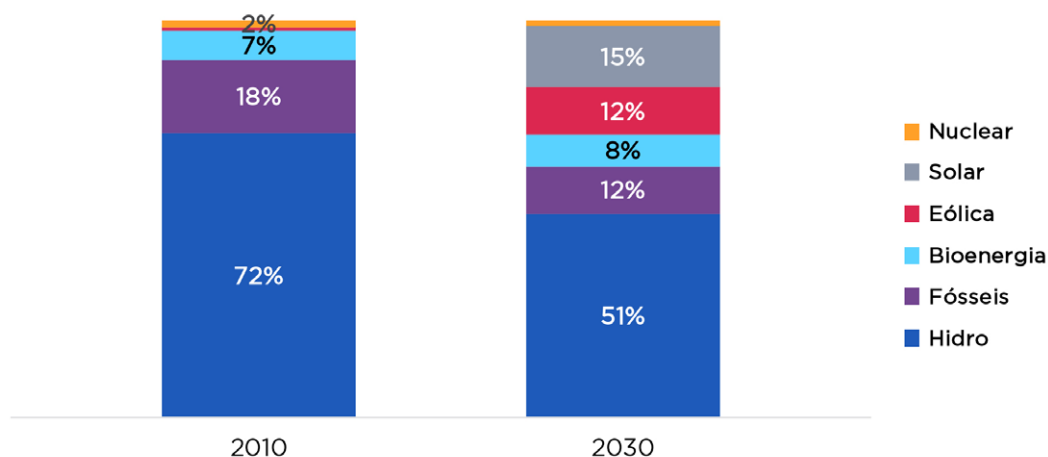
O Brasil é signatário desse Acordo, tendo se comprometido a reduzir até 2025 suas emissões de GEE em até 37% (comparados aos níveis emitidos em 2005) e em até 43% até 2030. O Brasil também se comprometeu a adiantar o fim do desmatamento ilegal de 2030 para 2028.

O Crescimento das Energias Renováveis

A Agência Internacional de Energia (IEA) projeta que as energias renováveis irão representar 86% da matriz de geração elétrica brasileira em 2030. Esse dado reflete um incremento gradual e contínuo da participação das fontes renováveis no Brasil, onde, em 2010, representava 80% da matriz.

Entretanto, embora o país tenha estabelecido sua infraestrutura de geração elétrica com base em seu potencial hidráulico, o crescimento das fontes renováveis não se dará, segundo a IEA, por meio da hidroeletricidade (que, pelo contrário, diminui) e sim por meio das fontes eólicas, solares e bioenergéticas, que, juntas, representarão 35% da capacidade instalada de geração elétrica brasileira em 2030, quase 4 vezes o percentual que representavam em 2010.

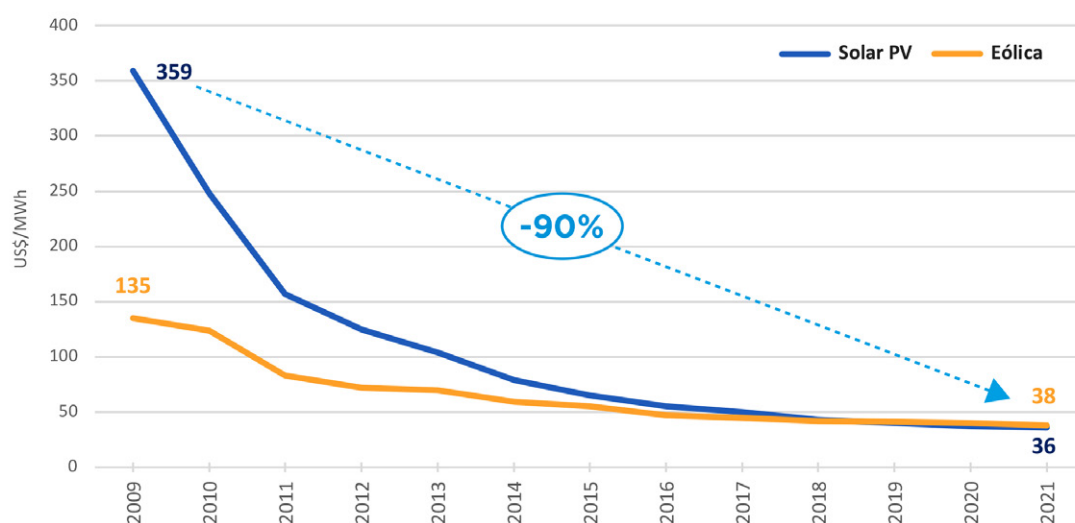
GRÁFICO 39 CAPACIDADE ELÉTRICA BRASILEIRA (GW)



Fonte: IEA, WEO 2020

Esse aumento é resultado da combinação da grande redução de custos observada nessas fontes na última década com o elevado potencial brasileiro para geração eólica (por apresentar ventos fortes, constantes e unidirecionais na maior parte de seu território), geração solar (com uma média anual de irradiação superior à da maioria dos países europeus) e geração de bioenergia, que apresenta alto grau de maturidade no país.

Embora o Brasil tenha estabelecido sua infraestrutura de geração elétrica com base em seu potencial hidráulico, o crescimento das fontes renováveis não se dará, segundo a IEA, por meio da hidroeletricidade e sim por meio das fontes eólicas, solares e bioenergéticas.



Fonte: Lazard Levelized Cost of Energy, 2021

Premissas Econômicas

As premissas macroeconômicas incorporadas na modelagem econômica baseiam-se nos *Shared Socioeconomic Pathways*³³ (SSPs). Os SSPs descrevem, qualitativa e quantitativamente, diferentes trajetórias de evolução da sociedade, economia e ecossistemas até o final do século (Riahi et al., 2017).

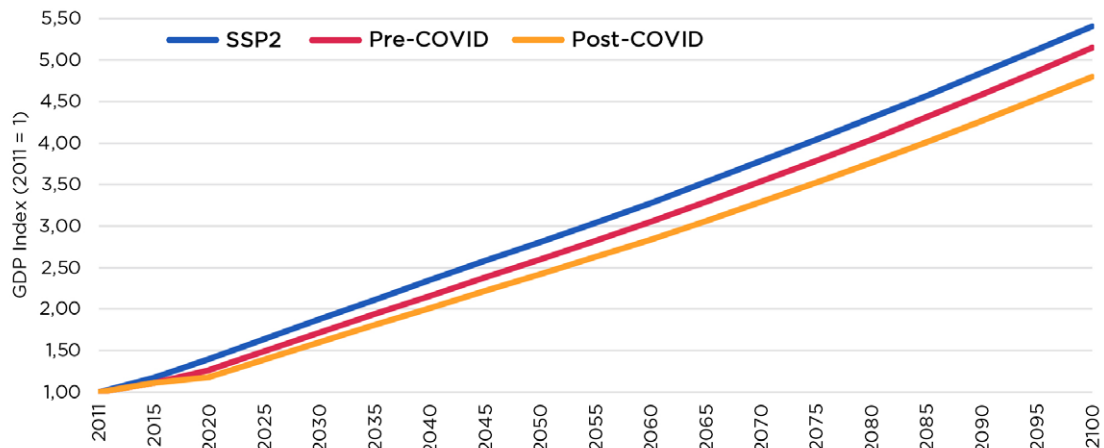
A primeira etapa para a elaboração das premissas macroeconômicas utilizadas neste estudo envolveu a atualização do cenário SSP2 (*Middle of the Road*). No SSP2 o mundo segue um caminho em que as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam significativamente, sendo marcado por padrões históricos. As projeções econômicas do SSP2 foram desenvolvidas pela *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) Environment Directorate, OECD Economics Department, Wittgenstein Centre for Demography and Global Human Capital e Potsdam Institute for Climate Impact Research (Riahi et al., 2017; KC, e Lutz, 2017; Dellink et al. 2017).

A atualização do SSP2, foi realizada a partir de dados históricos do *World Energy Outlook* (IEA, 2019), destacados na linha azul apresentada no gráfico abaixo, PIB global entre 2020 e 2100 a partir do cenário SSP2. Houve ainda a necessidade de realizar ajustes na trajetória de longo prazo de Produtos Interno Bruto (PIB) regionais, a partir das projeções mais recentes do FMI/WEO (2020), de maneira a incorporar os impactos da pandemia da COVID-19 sobre a atividade econômica em 2020, o que resultou na linha amarela. Dessa forma, foram incorporados impactos da pandemia sobre a atividade econômica global de modo que a recuperação econômica acompanhasse a taxa de crescimento econômico anual do SSP2 pós-2020.

33. Os SSPs apresentam um conjunto de cinco trajetórias socioeconômicas possíveis para o futuro global, com características distintas entre elas para crescimento populacional, desenvolvimento econômico, cooperação entre os países, evolução de níveis de desigualdade, entre outros.

GRÁFICO 41

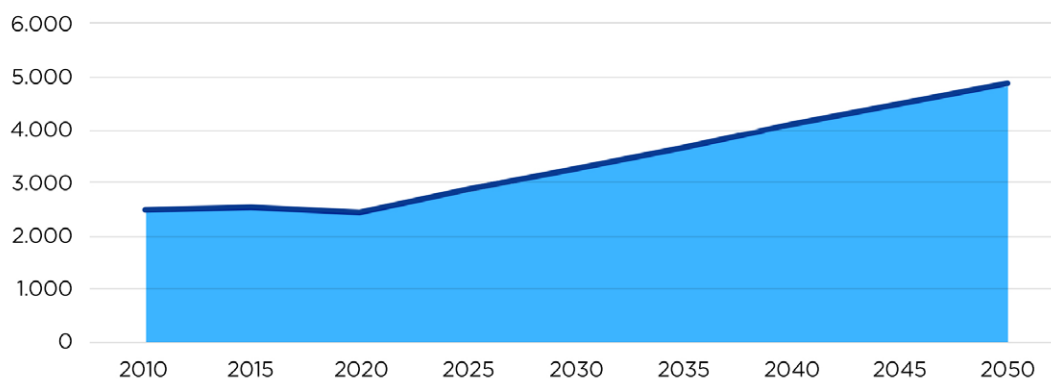
PIB GLOBAL ENTRE 2020 E 2100 A PARTIR DO CENÁRIO SSP2



Para o caso brasileiro, mesmo não prevendo nenhuma recuperação pós-crise (COVID-19), o cenário SSP2 (linha azul) projetava crescimento médio superior ao estimado pelo Focus (linha vermelha). No entanto, a partir de 2031, o cenário SSP2 prevê desaceleração do crescimento, em linha com a expectativa de redução do crescimento populacional, cuja taxa estimada no cenário SSP2 é 0,3% a.a., entre 2020 e 2050. Portanto, o cenário Realizado/SSP2 a ser utilizado neste estudo reflete a atualização das taxas de crescimento históricas do PIB, entre 2011-2019, e os impactos da COVID-19 sobre a atividade econômica, no Brasil, em 2020.

GRÁFICO 42

PIB BRASILEIRO ENTRE 2020 E 2050 A PARTIR DO CENÁRIO SSP2 (EM US\$ BILHÕES A PREÇOS DE 2010)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Febraban (2020)

Os cenários econômicos servem de base para a evolução das demandas setoriais de energia e agropecuária, necessárias ao modelo tecnológico BLUES – Brazil Land-Use and Energy Systems model (Rochedo *et al.*, 2018; Koberle, 2018). Em poucas palavras, o BLUES é um modelo de otimização, que tem como principal objetivo atender a demanda por serviços energéticos e alimentos do país (e do comércio exterior), ao menor custo possível. O modelo minimiza o custo total dos sistemas de energia e uso do solo, incluindo os setores de geração de eletricidade, agropecuária, indústria, transporte e edificações, sujeitos a restrições que representam restrições do mundo real para toda a gama de variáveis em questão, incluindo o setor de uso da terra.

TABELA 8. PREMISSAS ECONÔMICAS E DEMOGRÁFICAS

	POPULAÇÃO (MILHÕES DE HABITANTES)	PIB (bilhões US\$2010/ano)
2010	282,4	2.486,1
2015	304,0	2.530,1
2020	324,7	2.455,5
2025	343,0	2.886,0
2030	358,2	3.294,3
2035	371,5	3.686,3
2040	382,6	4.089,7
2045	391,1	4.496,1
2050	396,7	4.896,8

Modelos de Avaliação Integrada

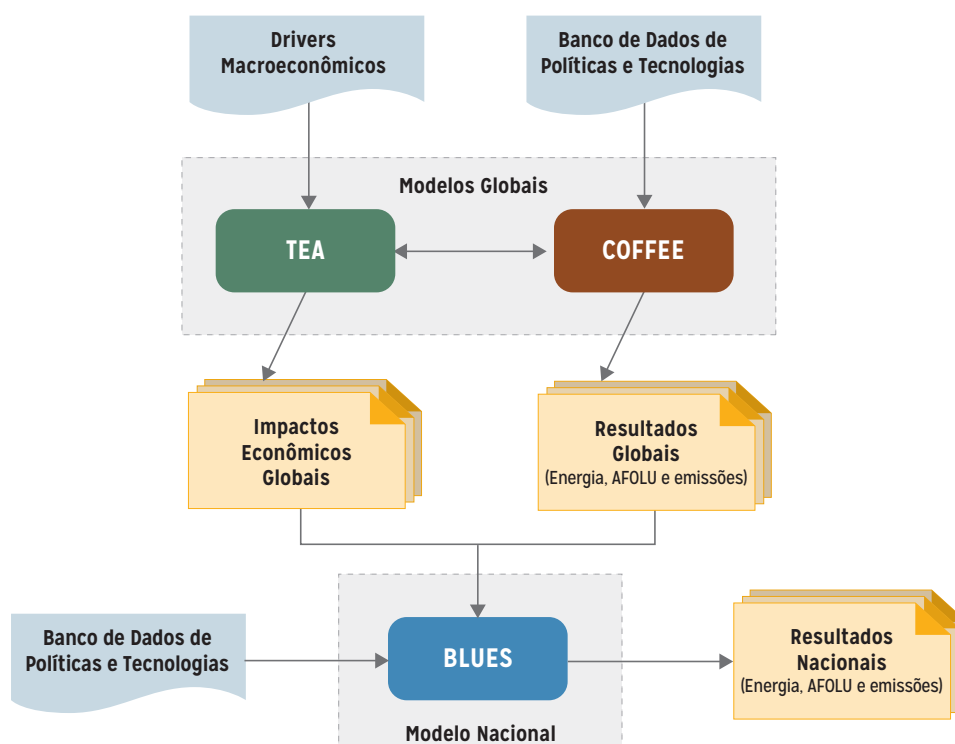
O procedimento metodológico faz uso do conjunto de modelos que vêm sendo desenvolvidos no laboratório Cenergia, da COPPE/UFRJ, ao longo dos últimos 20 anos, no seio de uma equipe multidisciplinar com experiência de atuação nas áreas de engenharia, economia e política pública. Esses modelos, chamados de Modelos de Avaliação Integrada (*Integrated Assessment Models* – IAMs) trazem representações dos sistemas energético, de uso do solo, recursos hídricos e impactos ambientais que são utilizadas para a construção de cenários de médio-longo prazo diante de premissas socioeconômicas, tecnológicas, de políticas públicas, e ambientais. IAMs são ferramentas frequentemente utilizadas por grupos de pesquisa internacionais e pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) para definir cenários de transição para um mundo de baixo carbono, considerando as interações entre os diferentes setores econômicos, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e suas consequências para o clima global.

Conforme descrito a seguir, três IAMs desenvolvidos no Cenergia/COPPE são usados em conjunto para a realização de cenários de longo prazo.

- **COFFEE** (*Computable Framework For Energy and the Environment*): modelo de otimização *bottom-up* com extenso detalhamento tecnológico dos sistemas energético e de uso do solo em escala global, usado para avaliação de estratégias globais e regionais de mitigação e desenvolvimento tecnológico. Divide o mundo em 18 regiões.
- **BLUES** (*Brazilian Land-Use and Energy System*): modelo de otimização nacional *bottom-up*, que descreve em mais detalhes tecnologias convencionais e de mitigação, investimentos e custos de operação e manutenção dos setores de energia, uso da terra e uso da água, em cinco regiões brasileiras, mais bem detalhado na sequência.
- **TEA** (*Total-Economy Assessment*): modelo global de equilíbrio geral computável (*Computable General Equilibrium – CGE*), que simula o funcionamento da economia através da análise simultânea das interações existentes entre regiões, setores e agentes econômicos. Divide o mundo nas mesmas 18 regiões que o modelo COFFEE e possui representação mais detalhada dos setores agropecuário e energético, além do comércio internacional.

Esse conjunto de modelos interage de forma a construir cenários e capturar estratégias para o alcance de metas de descarbonização e outras políticas ambientais. O uso de diferentes modelos permite captar elementos que são mais bem analisados conforme o tipo de metodologia (equilíbrio geral computável ou tecnológico) e nível de detalhamento (nacional ou global). O processo de integração entre os modelos é um processo contínuo de aprimoramento e de troca de informações, conforme representado pela figura abaixo.

FIGURA 4 INTERAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE AVALIAÇÃO INTEGRADA



O fluxo de informações e dados tem início com a definição dos cenários macroeconômicos e seus principais *drivers*, tais como taxas de crescimento da população e do PIB. A partir dos *drivers* macroeconômicos, inicia-se um processo de troca de informações e interações entre o modelo econômico de equilíbrio geral (TEA) e os modelos tecnológicos global (COFFEE) e nacional (BLUES).

Por um lado, os modelos COFFEE e BLUES fornecem informações sobre a evolução e sobre a penetração de diferentes tecnologias e de mudanças no uso da terra, bem como sobre a evolução da intensidade energética setorial, representada pela relação entre o uso de energia e o nível de atividade dos setores ao longo do horizonte de análise. Por serem modelos com alto grau de detalhamento tecnológico, é possível depreender em detalhe os efeitos de políticas (ex. políticas climáticas), de curva de aprendizagem, e de interação setorial entre os diferentes segmentos dos setores de energia e de uso da terra.

Pelo lado da análise econômica, o modelo de equilíbrio geral (TEA) provê a evolução da demanda final por bens e serviços, para cada setor, das diferentes regiões no mundo – que servem de dados de entrada para o modelo COFFEE³⁴. Posteriormente, o modelo mundial (COFFEE) fornece as demandas ao modelo nacional (BLUES), assim como o limite de emissões acumuladas disponíveis para o país em 2050, conforme diferentes cenários de governança climática. A demanda, por sua vez, afeta a evolução dos sistemas energéticos e de uso da terra, alterando a decisão ótima destes modelos, o que leva a um processo iterativo que se encerra quando há convergência entre as trajetórias setoriais. Por fim, como resultado, obtém-se os impactos econômicos sobre o nível de atividade (PIB), bem como sobre a evolução do investimento, e da produtividade do capital e trabalho.

Assim sendo, os modelos integrados TEA-COFFEE fornecerão as variáveis de contorno sobre as demandas internas e sobre o comércio internacional nos sistemas energético e agropecuário, de acordo com cada cenário representativo de transição mundial de baixo carbono. Tais variáveis de contorno serão utilizadas como dados de entrada do modelo de energia e uso do solo nacional (BLUES) para avaliar os impactos específicos nos setores elétrico (matriz elétrica e eletrificação do transporte), O&G (produção, refino), biocombustíveis e agropecuário (*commodities*, alimentos). Devido à troca de informações entre eles, não é possível separar completamente a elaboração de um modelo em relação a outro. No entanto, dependendo do tipo de análise que se deseja fazer, o modelo mais indicado é escolhido, levando em conta suas características e especificidades. Tal modelo é utilizado de forma independente. No caso dos Cenários de Transição Energética, o modelo BLUES é o mais indicado para a análise, por ser o modelo nacional, com resultados para as cinco regiões brasileiras e possuir maior detalhamento tecnológico.

No caso dos Cenários de Transição Energética, o modelo BLUES é o mais indicado para a análise, por ser o modelo nacional, com resultados para as cinco regiões brasileiras e possuir maior detalhamento tecnológico.

34. Ressalta-se que as demandas do setor energético nos modelos COFFEE e BLUES são demandas por serviços energéticos, em que o modelo é livre para escolher o portfólio de fontes finais de energia que podem atender a essas demandas através de diferentes tecnologias de uso final de energia (veículos, plantas termelétricas, caldeiras industriais, aquecedores de água residenciais etc.). No caso do módulo de uso do solo, as demandas são por produtos agropecuários, considerando os mercados interno e externo fornecidos pelo modelo TEA.

Modelo BLUES

O modelo MESSAGE foi desenvolvido originalmente no *International Institute for Applied System Analysis* (IIASA), na Áustria, para a otimização de um sistema energético, com suas demandas e suas ofertas (Gritsevskiy & Nakicenov, 2000; IAEA, 2007). Atualmente, é utilizado por diversos grupos de pesquisa pelo mundo, sendo aplicado para setores energéticos há décadas, tanto para balanços de energia quanto para balanços de massa (Clarke et al., 2014; Riahi et al., 2014; Lucena et al., 2015).

O princípio matemático do MESSAGE é a otimização de uma função-objetivo sujeita a um conjunto de restrições que definem a região viável que contém as soluções possíveis do problema (IAEA, 2007). O valor da função objetivo ajuda a escolher a melhor solução, de acordo com um critério específico, usualmente, a minimização do custo. Numa classificação mais geral, o MESSAGE é um modelo de programação inteira mista (permite que algumas variáveis sejam definidas como inteiras), utilizado para a otimização de um sistema de energia.

O modelo foi projetado para formular e avaliar alternativas de estratégias para o suprimento de energia, em consonância com restrições como limites de investimentos, disponibilidade e preço de combustíveis, regulação ambiental e taxas de penetração de mercado para novas tecnologias, dentre outras. Aspectos ambientais podem ser avaliados contabilizando-se e, se necessário, limitando-se as emissões

de poluentes por diversas tecnologias em vários níveis da cadeia energética. Isso ajuda a avaliar o impacto de regulações ambientais no desenvolvimento do sistema energético.

Os custos e características de desempenho (eficiências, fatores de capacidade, indicadores ambientais etc.) de alternativas tecnológicas estão entre os dados de entrada mais importantes para o modelo.

Neste estudo, foi utilizado o modelo BLUES (*Brazilian Land-Use and Energy System*). O BLUES é um modelo de otimização de mí-

nimo custo para o Brasil, que foi construído na plataforma de geração de modelos MESSAGE (Modelo para Alternativas de Estratégia de Fornecimento de Energia e seus Impactos Ambientais Gerais). Os custos e características de desempenho (eficiências, fatores de capacidade, indicadores ambientais etc.) de alternativas tecnológicas estão entre os dados de entrada mais importantes para o modelo. Esses valores podem mudar ao longo da escala de tempo do modelo, o que o torna muito sensível a eles. Por exemplo, é possível representar redução de custos e melhoria de eficiência de tecnologias com o passar do tempo. Cada fonte de energia primária pode ser dividida em um número opcional de classes, levando em conta os custos de extração, a qualidade das fontes e a localização das reservas. Essas fontes primárias de energia são transformadas, direta ou indiretamente, em fontes de energia secundárias e finais e, por último, em serviços de energia para atender à demanda. As demandas de energia podem ser divididas regionalmente e, em certos casos, quanto à eletricidade, é possível representar uma curva de carga do sistema. O custo total do sistema energético inclui os custos de investimento, custos operacionais e custos adicionais, como “penalidades” para certas alternativas ou custos ambientais e sociais.

O modelo minimiza os custos de todo o sistema de energia, incluindo os setores de geração de eletricidade, agricultura, indústria, transporte e construção, sujeitos a restrições que representam restrições do mundo real para toda a gama de variáveis em questão. Ele também inclui o setor de uso da terra, de acordo com a metodologia proposta em Koberle (2018).

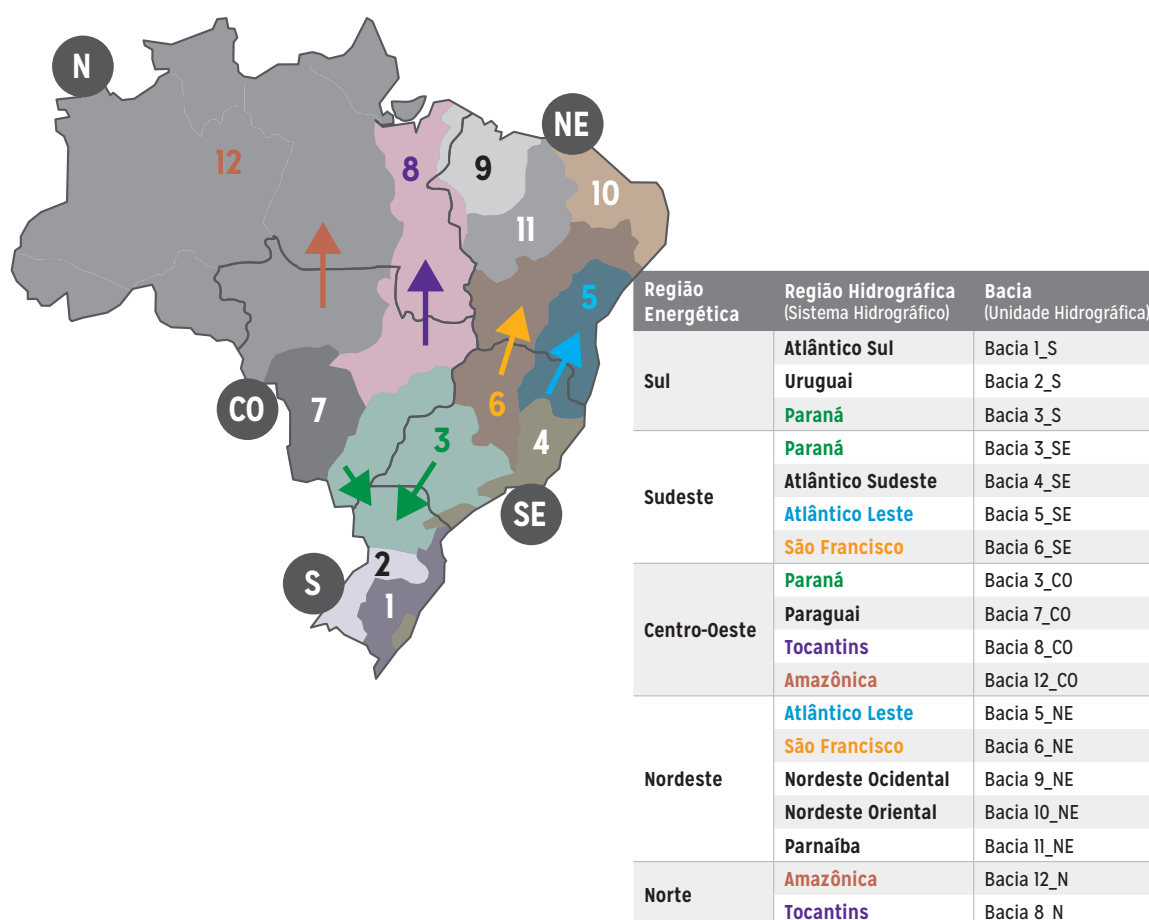
O BLUES tem seis regiões, uma representando processos de âmbito nacional na qual cinco sub-regiões estão aninhadas, seguindo a divisão geopolítica do Brasil. O BLUES otimiza o sistema de energia (*foresight*) em relação a futuras condições técnico-econômicas entre 2010 e 2050 em intervalos de 5 anos, minimizando o custo total do sistema, e tendo visão perfeita (*perfect*) e políticas. Cada ano representativo é dividido em 12 dias representativos (um para cada mês) compostos por 24 horas representativas. Em outras palavras, existem 12 curvas de carga de 24 horas cada, levando a um total de 288 fatias de tempo por ano. A geração de energia deve equilibrar a oferta para cada fatia de tempo. O sistema de energia é representado em detalhe nos setores de transformação, transporte e uso de energia, com mais de 1500 tecnologias personalizadas para cada uma das seis regiões nativas.

Vásquez-Arroyo (2018) incorporou ao modelo BLUES um módulo de contabilização, restrição e precificação do uso de recursos hídricos pelo sistema energético. Na medida em que há diferenças na regionalização do setor energético (baseado nas macrorregiões políticas) e do setor de recursos hídricos (baseado nas macrorregiões hidrográficas), Vásquez-Arroyo (2018) propôs a compatibilização apresentada na Figura 6. Orosco (2020), por sua vez, desenvolveu um modelo com interface para os resultados do BLUES para análise integrada de recursos hídricos. Com esses módulos, o modelo BLUES permite avaliar de forma integrada as seguranças alimentar, energética e hídrica.

FIGURA 5 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO BLUES



FIGURA 6 COMPATIBILIZAÇÃO DAS REGIÕES HIDROGRÁFICAS E ENERGÉTICAS NO BLUES



Setor Elétrico

O modelo BLUES tem um alto nível de detalhamento ao longo da cadeia de produção de eletricidade, desde a disponibilidade detalhada dos recursos energéticos nacionais (e importados), das tecnologias de geração elétrica, até as diferentes tecnologias de uso final. O detalhamento deste último nível permite, por exemplo, avaliar opções de eficiência energética, eletrificação de processos industriais e eletromobilidade. A tabela 9 apresenta as tecnologias de geração elétrica disponíveis no modelo BLUES, seus custos e parâmetros técnicos. No que diz respeito à representação das regiões brasileiras, as 5 regiões do BLUES são suficientes para permitir a análise dos intercâmbios elétricos entre as regiões, assim como do aproveitamento dos potenciais energéticos locais.

Além disso, o modelo conta com uma representação da curva de carga da demanda, assim como os perfis sazonal e diário de recursos energéticos renováveis, em especial hidrelétrico, eólico e solar. Isso permite avaliar o balanço de energia no nível horário, garantindo o equilíbrio entre oferta e demanda frente à variabilidade de fontes renováveis variáveis. Tal equilíbrio é, também, garantido por restrições e requisitos de integração de fontes intermitentes.

TABELA 9. PARÂMETROS ECONÔMICOS DAS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA

CUSTOS (US\$ 2010/KW)	2020	2030	2040	2050
Eólica Onshore	1.236	980	874	752
Eólica Offshore	6.560	5.467	4.783	4.100
Fotovoltaica	941	888	738	512
Energia Solar Concentrada - 7,5h de armazenamento	5.298	4.434	4.080	3.912
Energia Solar Concentrada - Cilindro Parabólico - 12h de armazenamento	6.055	5.036	4.620	4.422
Energia Solar Concentrada - Torre Solar - 12h de armazenamento	9.614	7.996	7.335	7.021
Energia Solar Concentrada com biomassa de Jurema	5.856	4.496	3.919	3.708
Gás Ciclo Aberto	800	720	600	600
Gás Ciclo Combinado	1.190	1.000	1.000	1.000
Gás Ciclo Combinável Flexível	1.500	1.300	1.200	1.200
Gás Ciclo Combinado Flexível CCS	3.091	2.790	2.520	2.400
Carvão Nacional	3.000	2.700	2.250	2.250
Carvão Importado	2.500	2.250	1.875	1.875
Carvão Importado CCS	4.275	4.275	3.563	3.563
Carvão Importado - Gasificação Ciclo Combinado	2.600	2.600	2.600	2.600
Carvão Gasificação Ciclo Combinado com CCS	3.500	3.500	3.500	3.500
Biomassa Existente	4.665	4.665	4.665	4.665
Biomassa Nova	5.300	5.300	5.300	5.300
Nuclear Existente	4.000	4.000	4.000	4.000
Nuclear Nova	4.000	4.000	4.000	4.000
Hidroelétrica Pequena	2.936	2.936	2.936	2.936
Hidroelétrica Média	2.513	2.513	2.513	2.513
Hidroelétrica Grande	2.091	2.091	2.091	2.091
Hidroelétrica Reversível	2.650	2.650	2.650	2.650
Óleo Rankine	1.400	1.400	1.400	1.400
Óleo Gerador	900	900	900	900
Gás Gerador	900	900	900	900
Biodiesel Gerador	1.200	1.200	1.200	1.200
Etanol Gerador	1.500	1.500	1.500	1.500

Setor de O&G e Biocombustíveis

A metodologia utilizada no modelo BLUES parte do potencial de recursos de diferentes tipos de petróleo e gás natural, incluindo a estimativa da disponibilidade de recursos a diferentes custos de produção. A metodologia para avaliação da transição para o *upstream* do setor de O&G considera três possíveis etapas distintas do desenvolvimento e da produção de petróleo bruto: recuperação primária, secundária e terciária (ou aprimorada). Durante a recuperação primária, a pressão natural do reservatório é elevada por gravidade e por técnicas de elevação artificial (como bombas), que trazem o óleo para a superfície. Já as técnicas de recuperação secundárias prolongam a vida produtiva de um campo injetando água ou gás para substituir o óleo e levá-lo para um poço de produção. Finalmente, o *Enhanced Oil Recovery* (EOR) é um conjunto de técnicas para aumentar a quantidade de petróleo bruto que pode ser extraído de um campo de petróleo, o que estende sua vida útil, porém com maiores custos de produção (Rochedo, 2016). Diante dessas possibilidades, os impactos de cenários de descarbonização podem ser percebidos em termos de volume de produção e exportação de óleo bruto no modelo.

O BLUES também possui uma representação detalhada das opções de biocombustíveis, desde opções convencionais (ex: etanol e biodiesel) a opções de biocombustíveis avançados. Esta última categoria inclui opções tecnológicas de produção de energéticos análogos aos combustíveis fósseis convencionais (ex: diesel, querosene, *bunker*), que podem ser utilizados diretamente (*drop-in*), mas que não contribuem com emissões diretas de CO₂.

Dentro do contexto de trajetórias de baixo carbono, os biocombustíveis podem configurar uma grande vantagem competitiva do Brasil, especialmente considerando a disponibilidade de terra, os rendimentos agropecuários favoráveis e a experiência nacional no tema. Os biocombustíveis avançados podem representar um investimento estratégico na transição para uma economia de baixo carbono para diversos setores, como o setor industrial, não só como energia, mas também como insumo para produção de petroquímicos. A aplicação mais ampla dos biocombustíveis é no setor de transportes, onde podem promover uma descarbonização com menor necessidade

de alteração da infraestrutura existente e menor impacto do perfil de consumo (como no caso de veículos elétricos a bateria).

Algumas rotas de biocombustíveis avançados e biomassa para produção de petroquímicos podem contribuir para metas mais ambiciosas de descarbonização da economia pelo uso de Captura e Armazenamento de Carbono.

Algumas rotas de biocombustíveis avançados e biomassa para produção de petroquímicos podem contribuir para metas mais ambiciosas de descarbonização da economia

pelo uso de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS, em inglês). O CCS acoplado a cadeia de conversão de biomassa podem alcançar emissões negativas.

Por fim, podem existir correlação entre os investimentos da cadeia de O&G e dos biocombustíveis, seja na cadeia logística, seja em investimentos de unidades de processamento. Assim, existem riscos e oportunidade ora conflitantes, ora complementares nas duas cadeias, que merecem ser avaliados criteriosamente.

TABELA 10. PARÂMETROS ECONÔMICOS DAS TECNOLOGIAS DE BIOCOMBUSTÍVEIS

CUSTOS DE INVESTIMENTOS (US\$ 2010/KW)	2020	2030	2040	2050
Bioquerosene Avançado	8.016	8.016	8.016	8.016
Bioquerosene Avançado com CCS	8.120	8.120	8.120	8.120
Biodiesel avançando (planta grande)	5.350	5.350	5.350	5.350
Biodiesel avançando com CCS (planta grande)	5.420	5.420	5.420	5.420
Biodiesel avançando	7.758	7.758	7.758	7.758
Biodiesel avançando com CCS	7.859	7.859	7.859	7.859

Setor de Transportes

O setor de transportes no BLUES é dividido entre passageiro e carga.

TABELA 11. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA CARROS

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Gasolina	18.000	18.000	18.000	18.000
Gasolina + Eficiente	22.715	21.272	19.828	18.384
Flex	18.000	18.000	18.000	18.000
Flex + Eficiente	22.715	21.272	19.828	18.384
GNV	20.000	20.000	20.000	20.000
GNV + Eficiente	26.000	26.000	26.000	26.000
Híbrido gasolina	30.000	27.991	23.411	19.287
Híbrido + Eficiente	50.992	50.992	50.992	50.992
Híbrido Flex	44.441	44.441	44.441	44.441
Elétrico a Bateria	37.297	33.116	26.176	21.425
Célula Combustível de Hidrogênio	52.995	36.707	30.327	24.703
Célula Combustível a Etanol	51.409	38.483	31.773	25.980

TABELA 12. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA MOTOS

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Gasolina	7.000	7.000	7.000	7.000
Gasolina + Eficiente	10.000	10.000	10.000	10.000
Flex	10.000	10.000	10.000	10.000
Elétrica	8.000	7.000	7.000	7.000

TABELA 13. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA ÔNIBUS

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	80.000	80.000	80.000	80.000
Diesel + Eficiente	107.000	107.000	107.000	107.000
Etanol	107.000	107.000	107.000	107.000
Elétrico	226.990	181.642	134.640	111.577
Célula Combustível de Hidrogênio	227.937	175.323	134.080	111.227
Célula Combustível a Etanol	227.937	179.673	137.129	113.599
Micro Diesel	70.000	70.000	70.000	70.000
Micro Diesel + Eficiente	72.000	72.000	72.000	72.000
Micro Etanol	73.000	73.000	73.000	73.000

TABELA 14. PARÂMETROS ECONÔMICOS VEÍCULOS COMERCIAIS LEVES (CARGA)

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	30.000	30.000	30.000	30.000
Diesel + Eficiente	34.000	34.000	34.000	34.000
Elétrico a bateria	48.394	42.203	31.751	28.165
Célula Combustível a Hidrogênio	51.650	36.180	31.291	26.984
Célula Combustível a Etanol	50.736	36.593	31.721	27.441

TABELA 15. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA CAMINHÕES SEMILEVES

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	35.000	35.000	35.000	35.000
Diesel + Eficiente	41.000	41.000	41.000	41.000
Elétrico a bateria	56.460	49.237	37.043	32.859
Célula Combustível a Hidrogênio	60.259	42.210	36.506	31.482
Célula Combustível a Etanol	59.192	42.691	37.007	32.015

TABELA 16. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA CAMINHÕES LEVES

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	40.000	40.000	40.000	40.000
Diesel + Eficiente	46.000	46.000	46.000	46.000
Elétrico a bateria	64.525	56.271	42.335	37.554
Célula Combustível a Hidrogênio	68.867	48.240	41.721	35.979
Célula Combustível a Etanol	68.867	52.576	45.240	38.841

TABELA 17. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA CAMINHÕES MÉDIOS

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	55.000	55.000	55.000	55.000
Diesel + Eficiente	61.000	61.000	61.000	61.000
Elétrico a bateria	103.681	92.328	71.662	63.603
Célula Combustível a Hidrogênio	107.574	80.578	70.117	60.897
Célula Combustível a Etanol	107.574	86.141	74.661	64.565

TABELA 18. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA CAMINHÕES SEMIPESADOS

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	100.000	100.000	100.000	100.000
Diesel + Eficiente	108.000	108.000	108.000	108.000
Elétrico a bateria	148.579	131.850	101.764	90.414
Célula Combustível a Hidrogênio	137.206	109.647	95.248	83.221
Célula Combustível a Etanol	133.419	112.149	97.521	85.032

TABELA 19. PARÂMETROS ECONÔMICOS PARA CAMINHÕES PESADOS

CUSTO (US\$ 2010/VEÍCULO)	2020	2030	2040	2050
Diesel	140.000	140.000	140.000	140.000
Diesel + Eficiente	152.000	152.000	152.000	152.000
Elétrico a bateria	208.011	184.590	142.470	126.580
Célula Combustível a Hidrogênio	192.088	153.505	133.347	116.509
Célula Combustível a Etanol	186.786	157.009	136.530	119.046

Setor Agropecuário

O setor agropecuário brasileiro possui grande importância mundial tanto para a produção de alimentos quanto de commodities bioenergéticas. O modelo BLUES, devido ao seu nível de detalhamento tecnológico e espacial do Brasil, é capaz de determinar as influências de diferentes cenários de longo prazo no setor agropecuário do país. O BLUES possui a representação de 21 produtos agropecuários (Figura 7), os quais são produzidos para atingir demandas exógenas de alimentos e de commodities bioenergéticas informadas pelos modelos TEA-COFFEE. Insumos agropecuários para a produção de biocombustíveis tradicionais e avançados são determinados pelo próprio modelo BLUES de forma a atingir metas da matriz energética brasileira e climáticas mundiais.

FIGURA 7 PRODUTOS AGROPECUÁRIOS E ENERGÉTICOS

AGRICULTURA		
Algodão	Cana-de-Açúcar	Vegetais
Arroz	Cereais	Frutas
Café	Feijões	Gramíneas
Floresta Plantada	Milho	Raízes
Trigo	Nozes	Soja
Oleaginosas		
PECUÁRIA		
Gado de Corte	Gado Leiteiro	Galinha Poedeira
Carne de Frango	Carne de Porco	

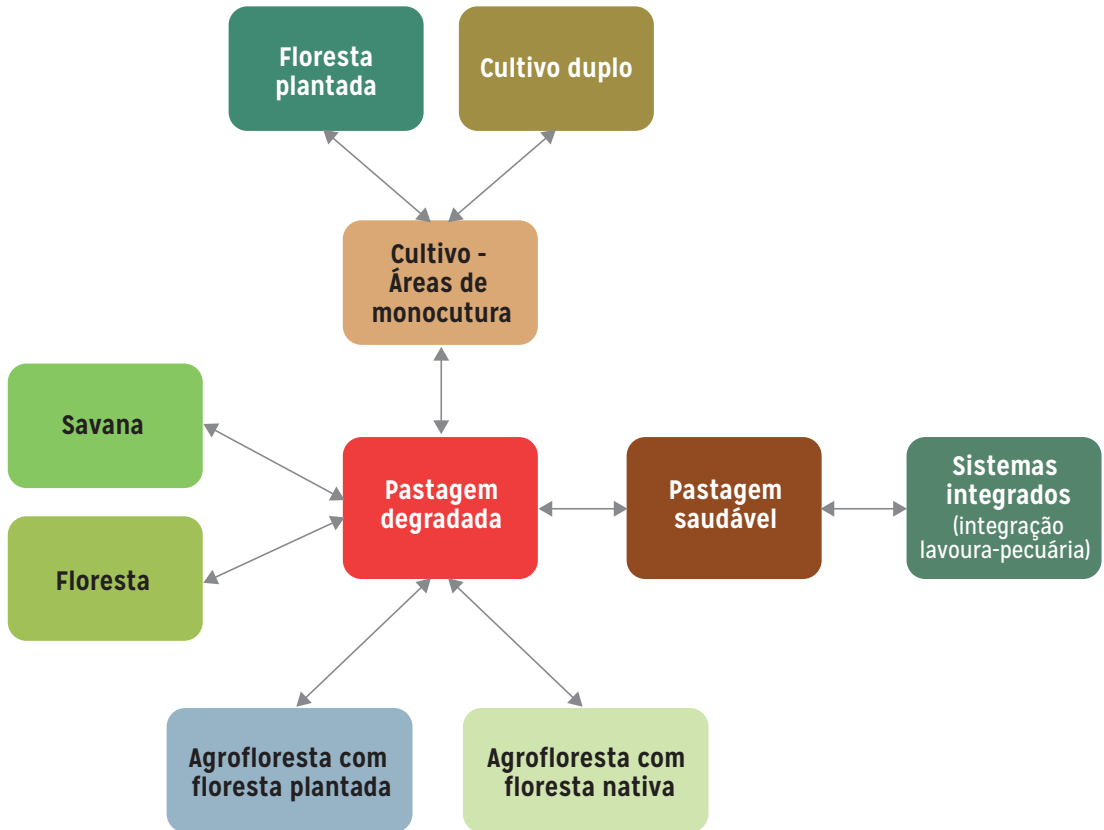
O modelo possui três tipos distintos de meios de produção agrícola de cultivo simples (Padrão Histórico, Alta Produtividade e Orgânicos) e um de cultivo duplo (safra e safrinha) que foram desenvolvidos de forma regionalizada e respeitando as condições edafoclimáticas, aptidões de cultivo e especificidades de cada região do país de forma a desenvolver parâmetros técnicos e econômicos de produção agrícola condizentes. Além disso, o setor pecuário de corte possui dois tipos de produção bovina, a extensiva em pasto degradado e a extensiva em pasto recuperado, e sistemas integrados que possuem a participação tanto da parte agrícola quanto pecuária dentro de uma só região.

Esse nível de detalhamento do setor agropecuário é de suma importância para determinar as necessidades das mudanças de uso do solo existentes no modelo.

Esse nível de detalhamento do setor agropecuário é de suma importância para determinar as necessidades das mudanças de uso do solo existentes no modelo (Figura 8), como a migração de floresta para pastagens degra-

dadas ou então abertura de novas zonas para o cultivo de culturas bioenergéticas. Cada transição do uso do solo possui emissões, insumos e custos atrelados que tornam possível o modelo atingir a meta de otimização de menor custo e indicar medidas de mitigação que auxiliem no atingimento de metas climáticas de cenários de longo prazo.

FIGURA 8 TRANSIÇÕES DE USO DA TERRA MODELADAS NO BLUES



Glossário

BECCS	Refere-se à bioenergia associada a sistemas de captura, transporte e estocagem de carbono, ou BECCS (sigla para <i>BioEnergy with Carbon Capture and Storage</i> , em inglês). A diferença entre o CCS e o BECCS está na fonte utilizada na combustão. No caso do BECCS, as fontes são renováveis, como biomassas diversas (resíduos, pinus, eucalipto, bagaço de cana-de-açúcar). O CO ₂ (dióxido de carbono) absorvido no ciclo de crescimento da biomassa é capturado no processo de conversão dessa biomassa em bioenergia, impedindo que o CO ₂ absorvido pela planta volte para a atmosfera. Assim, ao incorporar a etapa de captura, considera-se que o sistema é capaz de "remover o CO ₂ da atmosfera", ou prover emissões líquidas negativas, uma vez que o CO ₂ absorvido pela planta é capturado. Exemplos de BECCS incluem a captura do carbono emitido durante a etapa de fermentação da cana-de-açúcar para produção de etanol, durante a combustão da biomassa para geração de eletricidade, durante a produção de biocombustíveis avançados, entre outros. No entanto, esta é ainda uma tecnologia em desenvolvimento, com poucos projetos em operação ao redor do mundo.
Biodiesel	O biodiesel é uma forma de combustível diesel derivado de plantas ou animais e consiste em ésteres de ácidos graxos de cadeia longa. É normalmente feito reagindo quimicamente com lipídios, como gordura animal (sebo), óleo de soja ou algum outro óleo vegetal com um álcool, produzindo um éster metílico, etílico ou propílico.
CCS	Captura e armazenamento de carbono (CCS) é o processo de capturar e armazenar dióxido de carbono (CO ₂), impedindo que ele seja liberado na atmosfera. Pode ser utilizado em usinas termelétricas para geração de eletricidade, por exemplo, visando a redução das emissões. Além da captura, deve ser considerado o transporte e o armazenamento ou uso do gás capturado.
CSP	Energia solar concentrada ou heliotérmica (do termo em inglês, <i>Concentrated Solar Power</i> - CSP), representa o conjunto de tecnologias que geram eletricidade e/ou calor através da conversão de energia solar concentrada. Esta energia solar é concentrada a partir de lentes ou espelhos e também pode ser usada para uma variedade de aplicações industriais, como dessalinização de água, óleo aprimorado recuperação, processamento de alimentos, produção química e processamento de minerais.
Etanol 1ª Geração	O etanol é produzido através da fermentação de açúcares (glicose, principalmente) usando cepas de leveduras. As principais matérias-primas do etanol de primeira geração são a cana de açúcar e o milho.

Etanol 2ª Geração	O etanol de segunda geração, diferentemente do etanol de primeira geração, é produzido a partir de açúcares extraídos da celulose da biomassa, como na palha e no bagaço da cana-de-açúcar.
Etanol BECCS	Durante a fermentação do etanol, os açúcares das matérias-primas convencionais para biocombustíveis são fermentados em etanol e CO ₂ . Dois terços do carbono contido nos açúcares acabam no etanol; o terço restante forma CO ₂ quase puro. A corrente de CO ₂ pode então ser separada por meio de uma separação gás-líquido, enquanto a mistura de etanol/água é normalmente separada por destilação.
Bioquerosene (HEFA)	Os óleos vegetais, gordura animal e outros ácidos graxos podem ser convertidos em combustíveis biojet por meio de três vias: hidroprocessamento, conhecido como jato renovável hidrotratado (HRJ) ou ésteres e ácidos graxos hidrotratados (HEFA); hidrotermólise catalítica e pirólise rápida, conhecida como Jato Celulósico Despolimerizado Hidrotratado (HDCJ). Os processos HEFA usam matérias-primas baseadas em triglicerídeos, mas os ácidos graxos livres (FFAs) são produzidos de forma diferente por clivagem de glicerídeos por propano e por hidrólise térmica, respectivamente. O bio-óleo usado na via HDCJ é obtido por pirólise da matéria-prima de biomassa. Até agora, apenas a via HEFA foi aprovada para mistura e tem uma especificação definida pela ASTM.
Bioquerosene (BTL)	A rota da Biomassa para Líquido (BTL) que compreende tecnologias bioquímicas e termoquímicas é considerada uma das principais alternativas verdes para a produção de produtos químicos de base biológica, combustíveis e energia. Dentre esses produtos, um dos combustíveis líquidos que vem recebendo muita atenção é o substituto do combustível convencional para aviação, denominado combustível renovável para aviação ou simplesmente biojet.
Diesel biocombustível (BTL)	O termo Biomassa para Líquido (BTL) é aplicado a combustíveis sintéticos feitos de biomassa por meio de uma rota termoquímica. O objetivo é produzir componentes de combustível que sejam semelhantes aos da atual gasolina de origem fóssil (gasolina) e combustíveis diesel e, portanto, podem ser usados em sistemas de distribuição de combustível existentes e com motores padrão.
Diesel biocombustível (BTL) CCS	As usinas de combustível Fischer-Tropsch (FT) oferecem uma oportunidade única para captura e armazenamento de carbono (CCS). O gás de síntese é removido do CO ₂ durante a limpeza do gás para aumentar a pressão parcial dos reagentes na seção FT. O fluxo resultante de CO ₂ quase puro do processo da unidade Selexol é facilmente capturado para o armazenamento de carbono, se desejado.
FV	Energia solar fotovoltaica (FV) converte diretamente a energia solar em eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Podem ter base fixa ou eixos móveis, responsáveis por um maior aproveitamento da energia solar durante o ano. Há, ainda, a instalação de módulos flutuantes sobre corpos hídricos.
GD	A Geração Distribuída (GD) é o termo usado para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es), onde o consumidor pode gerar sua própria eletricidade a partir de fontes renováveis ou cogeração.

Referências

ANGELKORTE, G. B. Modelagem do Setor Agropecuário Dentro de Modelo de Análise Integrada Brasileiro – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019. XIV, 123p.: il.; 29,7 cm.

CLARKE, L., JIANG, K., AKIMOTO, K, 2014. Assessing Transformation Pathways. In: IPCC Fifth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

CLARKE, Cenergia/COPPE, IBP. O setor de O&G brasileiro em um contexto de emissões líquidas nulas (net zero emissions). 2022. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2022/08/relatorio-ibp-cenergia-coppe.pdf>.

DE OLIVEIRA, C. C. N., ANGELKORTE, G., ROCHEDO, P. R. R., et al. “The role of bio-materials for the energy transition from the lens of a national integrated assessment model”, Climatic Change, v. 167, n. 3-4, p. 57, 28 ago. 2021. DOI: 10.1007/s10584-021-03201-1. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10584-021-03201-1>.

EIA, International Energy Outlook, 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/oulooks/ieo/>

GRITEVSKYI, A., NAKICENOVI, N., 2000, “Modeling uncertainty of induced technological change”, Energy Policy, 28, pp. 907-921.

IAEA, 2007. International Atomic Energy Agency, MESSAGE – User Manual, Vienna, Austria.

IEA. Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy. 2021. International Energy Agency.

IEA. World Energy Outlook 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.

KÖBERLE, A. Implementation of Land Use in an Energy System Model to Study the Long-Term Impacts of Bioenergy in Brazil and its Sensitivity to the Choice of Agricultural Greenhouse Gas Emission Factors. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. 135 f. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/aKoberle.pdf>.

KÖBERLE, A. C., GARAFFA, R., CUNHA, B. S., ROCHEDO, P., LUCENA, A. F., SZKLO, A., SCHAEFFER, R., 2018, “Are conventional energy megaprojects competitive? Suboptimal decisions related to cost overruns in Brazil”, Energy policy, v. 122, pp. 689-700.

LUCENA, A., CLARKE, L., SCHAEFFER, R., SZKLO, A., ROCHEDO, P., NOGUEIRA, L., DAEBZER, K., GURGEL, A., KITOUS, A., KOBER, T, 2015, "Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy", *Energy Economics*, 56, pp. 564-574.

MCTI, 2017. Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/open-cms/ciencia/SEPED/clima/opcoes_mitigacao/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_SetoresChave_do_Brasil.html.

MÜLLER-CASSERES, E., CARVALHO, F., NOGUEIRA, T., *et al.* "Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective", *Energy*, v. 219, p. 119444, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119444. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119444>.

OPEC. World Oil Outlook 2045. Organização dos Países Exportadores de Petróleo, 2022. Disponível em: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm

MCTIC. Acordo de Paris. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2015. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf.

OROSCO, R. T., 2020. Proposta de introdução do nexos da água com energia e uso do solo dentro de um modelo de avaliação integrada brasileiro (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

RIahi, K., VAN VUUREN, D.P., KRIEGLER, E., EDMONDS, J., O'NEILL, B.C., FUJIMORI, S., *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Chang* 2017; 42:153-68. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

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.

Rystad Energy. Carbon Footprints of Crude Grades-Are They All Alike? Free Global Emissions Series Report, Maio 2022.

VÁSQUEZ-ARROYO, E. M, 2018. Incorporação Do Nexos Energia-Água Em Um Modelo De Otimização Da Expansão Do Sistema Energético Brasileiro. 2018. 232. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Conselho Curador

Presidente

José Pio Borges

Presidente Emérito

Fernando Henrique Cardoso

Vice-Presidentes

Jorge Camargo

José Alfredo Graça Lima

Fundadores

Carlos Mariani Bittencourt

Celso Lafer

Daniel Klabin

Gelson Fonseca Jr.

João Clemente Baena Soares

Marcus Vinicius Pratini de Moraes

Maria do Carmo (Kati) Nabuco de Almeida Braga

Roberto Teixeira da Costa

Eliezer Batista da Silva (*in memoriam*)

Luciano Martins de Almeida (*in memoriam*)

Luiz Felipe Palmeira Lampreia (*in memoriam*)

Luiz Olavo Baptista (*in memoriam*)

Sebastião do Rego Barros Netto (*in memoriam*)

Walter Moreira Salles (*in memoriam*)

Vice-Presidentes Eméritos

Daniel Klabin

José Botafogo Gonçalves

Luiz Augusto de Castro Neves

Rafael Benke

Conselheiros Eméritos

Izabella Teixeira

Luiz Felipe de Seixas Corrêa

Luiz Fernando Furlan

Marcos Azambuja

Pedro Malan

Rubens Ricupero

Winston Fritsch

Diretora-Presidente

Julia Dias Leite

Conselheiros

Ana Toni

André Clark

André Lara Resende

Armando Mariante

Arminio Fraga

Clarissa Lins

Demétrio Magnoli

Edmar Bacha

Francisco Müssnich

Henrique Rzezinski

Ilona Szabó

Joaquim Falcão

José Aldo Rebelo

José Luiz Alquéres

Luiz Ildefonso Simões Lopes

Marcos Galvão

Paulo Hartung

Pedro Henrique Mariani

Renato Galvão Flôres Junior

Roberto Abdenur

Roberto Jaguaribe

Ronaldo Veirano

Sergio Amaral

Tomas Zinner

Vitor Hallack

Conselho Consultivo Internacional

Albert Fishlow
Alfredo Valladão
André Corrêa do Lago
Antonio Patriota
Felix Peña
Flávio Damico
Hussein Kalout
Ivan Sandrea

Jackson Schneider
Joaquim Levy
Leslie Bethell
Marcos Caramuru
Marcos Jank
Monica de Bolle
Paolo Bruni
Sebastião Salgado

Senior Fellows

Adriano Proença
Ana Célia Castro
Ana Paula Tostes
André Soares
Benoni Belli
Carlos Milani
Carlos Pereira
Daniela Lerda
Denise Nogueira Gregory
Diego Bonomo
Evangelina Seiler
Fabrizio Sardelli Panzini
Francisco Gaetani

Igor Rocha
José Mário Antunes
Larissa Wachholz
Leandro Rothmuller
Leonardo Burlamaqui
Lia Valls Pereira
Lourival Sant'anna
Mário Ripper
Matias Spektor
Miguel Correa do Lago
Monica Herz
Patrícia Campos Mello
Paulo Sergio Melo de Carvalho

Pedro da Motta Veiga
Philip Yang
Ricardo Ramos
Ricardo Sennes
Rafaela Guedes
Rogério Studart
Ronaldo Carmona
Sandra Rios
Sergio Gusmão Suchodolski
Tatiana Rosito
Vera Thorstensen
Victor do Prado

Associados

Aegea
Air Products
Altera
Arara.io
BAMIN
Banco Bocom BBM
BASF
BAT Brasil
Bayer
BMA Advogados
BRF
Bristow
Brookfield Brasil
CCCC/Concremat
Consulado Geral dos Países
Baixos no Rio de Janeiro
Consulado Geral da Irlanda em
São Paulo
Consulado Geral do México no
Rio de Janeiro
Consulado Geral da Noruega no
Rio de Janeiro
Desenvolve SP
Dynamo

EDF Norte Fluminense
EDP
Eletrobras
Embaixada da Austrália
Embaixada da China no Brasil
Embraer
ENEVA
ENGIE Brasil
Equinor
ExxonMobil
Furnas
Galp
Grupo Lorentzen
Grupo Ultra
Haitong
Huawei
IBÁ
IBRAM
Icatu Seguros
Instituto Clima e Sociedade
Itaú Unibanco
Klabin
Light
Machado Meyer

Mattos Filho Advogados
Museu do Amanhã
Microsoft
Neoenergia
Paper Excellence
PATRI
Petrobras
Pinheiro Neto Advogados
Promon Engenharia
Prumo Logística
Repsol Sinopec
Sanofi
Santander
Shell
Siemens
Siemens Energy
SPIC Brasil
State Grid
Suzano
Total E&P do Brasil
Unilever
Vale
Veirano Advogados
Vinci Partners

Equipe CEBRI

Diretoria

Diretora-Presidente
Julia Dias Leite

Diretora de Relações Externas
Carla Duarte

Diretora de Projetos
Luciana Gama Muniz

Diretor Acadêmico
Feliciano Guimarães

Diretora Administrativa
Financeira
Ana Paula Marotte

Executive Secretary
Julia Cordeiro

Projetos

Diretora Adjunta de Projetos
Marianna Albuquerque

Coordenadores de Projetos
Barbara Brant
Léa Reichert
Paulo Robilloti
Thais Jesinski Batista

Analista de Projetos
Eduardo Neiva Souza

Assistente de Projetos
Larissa Vejarano

Estagiário
Daniel Fontes

Relações Externas

Diretora Adjunta de Relações Externas
Fernanda Araripe

Coordenador de Relações Institucionais
Fernando Mattos

Coordenador de Projetos Especiais
Caio Vidal

Assistente de Relações Institucionais
Beatriz Pfeifer

Comunicação e Eventos

Gerente de Eventos
Nana Villa Verde

Analista de Eventos
Adriano Andrade

Assistente de Eventos
Isabella Ávila

Assistente de Comunicação
Daniele Thomaselli

Analista de TI
Eduardo Pich

Administrativo e Financeiro

Coordenadora Administrativa-Financeira
Fernanda Sancier

Analista Financeira
Gustavo Leal

Realização:



Patrocínio:



Apoio:

Siemens Energy é uma marca licenciada pela Siemens AG.